



TUGAS AKHIR - MO 141326

**ANALISIS TEGANGAN LOKAL MAKSIMUM *YOKE ARM* PADA  
*EXTERNAL TURRET MOORING SYSTEM* FSO LADINDA**

Ariesta Ayu Dian Anggraeni

NRP. 4311 100 092

DOSEN PEMBIMBING :

Yoyok Setyo H. ST., MT.Ph.D.

Ir. Joswan JS., M.Sc

JURUSAN TEKNIK KELAUTAN

Fakultas Teknologi Kelautan

Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Surabaya

2016



FINAL PROJECT - MO 141326

# MAXIMUM LOCAL STRESS ANALYSIS OF YOKE ARM EXTERNAL TURRET MOORING SYSTEM FSO LADINDA

Ariesta Ayu Dian Anggraeni

NRP. 4311 100 092

SUPERVISORS :

Yoyok Setyo H. ST., MT.Ph.D.

Ir. Joswan JS., M.Sc

DEPARTEMENT OF OCEAN ENGINEERING

Faculty of Marine Technology

Sepuluh Nopember Institute of Technology

Surabaya 2016



**ANALISIS TEGANGAN LOKAL MAKSIMUM YOKE ARM PADA  
EKSTERNAL TURRET MOORING SYSTEM FSO LADINDA**

**TUGAS AKHIR**

Diajukan untuk Memenuhi Salah Satu Syarat Memperoleh Gelar Sarjana Teknik pada  
Program Studi S-1 Jurusan Teknik Kelautan Fakultas Teknologi Kelautan  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya

Oleh

Ariesta Ayu Dian Anggraeni

NRP. 4311 100 092

Disetujui oleh:

1. Yoyok Setyo H. ST., MT.Ph.D (Pembimbing 1)

2. Ir. Joswan JS., M.Sc (Pembimbing 2)

3. Ir. Mas Murtedjo., M.Eng (Penguji 1)

4. Ir. Handayanu., M.Sc.Ph.D (Penguji 2)

5. Ir. Imam Rochani, M. Sc (Penguji 3)

6. Nur Syahroni., ST., MT.Ph.D (Penguji 4)



## **ANALISIS TEGANGAN LOKAL MAKSIMUM YOKE ARM PADA EKSTERNAL TURRET MOORING SYSTEM FSO LADINDA**

**Nama** : Ariesta Ayu Dian Anggraeni  
**NRP** : 4311100092  
**Jurusan** : Ocean Engineering – FTK ITS  
**Dosen Pembimbing** : Yoyok Setyo H. ST., MT.Ph.D  
Ir. Joswan JS ., MSc.

### **ABSTRAK**

Perkembangan sarana yang digunakan di industri migas memberikan banyak kemajuan teknologi inovasi seperti FSO dengan sistem tambat *External Turret Mooring System* berupa *Tower Mooring System*. Pada penelitian ini akan membahas kekuatan konstruksi sebuah *connector* pada *Yoke Arm* dengan FSO dimana pada bagian tersebut harus mampu menahan beban-beban yang bekerja pada FSO. Dengan mengetahui gerakan dari FSO terhadap beban gelombang, maka dapat diketahui besar tegangan yang terjadi pada sambungan FSO dan *yoke arm*. Karakteristik kapal dilihat dengan RAO gerakan translasi dan rotasi pada kondisi *full load*, *light load*, serta *free floating* dan *mooring*. Nilai terbesar pada kondisi *light load* pada gerakan translasi adalah gerakan *sway* 3.1571 m/m dan gerakan rotasi adalah gerakan *roll* sebesar 1.8130 deg/m saat *free floating*. Nilai terbesar pada kondisi *light load* pada gerakan translasi adalah gerakan *heave* 1.0915 m/m dan gerakan rotasi adalah gerakan *pitch* sebesar 0.8500 deg/m saat *mooring*. Akibat pergerakan dari FSO yang diakibatkan oleh beban lingkungan dengan skenario beberapa heading didapat Nilai *tension force* terbesar pada kondisi *light load* sebesar 99.906 N pada pembebanan arah *heading* 180 derajat. Hasil analisis dengan FEM untuk *connector yoke arm* menunjukkan besar tegangan maksimum (*von misses stress*) sebesar 178.61 MPa dari arah pembebanan *head sea* (180°). Berdasarkan acuan pada ketentuan ABS, tegangan *von mises* tidak lebih dari 90% dari *yield strength* sebesar 225 sehingga konstruksi sambungan *yoke arm* masih dalam batas aman.

**Kata Kunci:** *Connector Yoke Arm, External Turret Mooring, RAO, heaving, pitching, Von Misses Stress, Free Floating, Mooring*

## **MAXIMUM LOCAL STRESS ANALYSIS OF YOKE ARM EXTERNAL TURRET MOORING SYSTEM FSO LADINDA**

**Name** : Ariesta Ayu Dian Anggraeni  
**NRP** : 4311100092  
**Department** : Ocean Engineering – FTK ITS  
**Supervisors** : Yoyok Setyo H. ST., MT.Ph.D  
Ir. Joswan JS ., MSc.

### **ABSTRACT**

The development of the tools used in oil and gas industry providing many innovative technological advances such as the FSO with External Turret Mooring System in the form of Tower Mooring System. This research will discuss about construction strength of a connector on Yoke Arm with FSO which in turn must be able to withstand the loads acting on FSO. By knowing the movement of FSO to wave loads, it can be seen of the stress that occurs in connection with the yoke arm FSO. Characteristics of the FSO can be seen by RAO movement of translation and rotation with two conditions of full load and light load on the state of free floating and mooring. The greatest value at light load conditions at the translational movement is a sway movement 3.1571 m/m and the rotational movement is a roll movement of 1.8130 deg/m when free floating. The greatest value at light load conditions at the translational movement is a heave movement 1.0915 m/m and the rotational movement is the pitch movement of 0.8500 deg/m while mooring. Due to the movement of the FSO caused by environmental load scenarios heading gained some greatest tension at light load conditions for 99.906 N in the loading direction heading 180 degrees. Results of analysis by FEM for the yoke arm connector showed a large maximum stress (von misses stress) amounted to 178.61 MPa from the direction of loading head sea (180 °). By ABS rules, von mises stress of not more than 90% of the yield strength of 225 so that construction arm yoke connection still within safe limits.

**Keyword** : *Connector Yoke Arm, External Turret Mooring, RAO, heaving, pitching, Von Misses Stress, Free Floating, Mooring*

## Kata Pengantar

Puji syukur penulis ucapkan kepada Allah SWT yang telah memberikan segala rahmat dan hidayah sehingga penulis dapat menyelesaikan Tugas Akhir yang berjudul, “*Analisis Tegangan Lokal Maksimum Yoke Arm paa Eksternal Turret Mooring System FSO Ladinda*” ini dengan tepat waktu dan tanpa halangan yang berarti.

Tugas Akhir ini disusun sebagai syarat untuk mendapatkan gelar sarjana (S-1) di Jurusan Teknik Kelautan, Fakultas Teknologi Kelautan, Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya. Tugas Akhir ini berisi tentang analisis gerakan pada FSO Ladinda, kemudian dicari *tension force* yang dihasilkan oleh *yoke arm* yang menghubungkan antara FSO dengan *Tower Mooring System* digunakan sebagai pembebanan pada pemodelan lokal struktur sehingga didapatkan hasil tegangan maksimum untuk mengetahui apakah struktur masih aman untuk beroperasi dengan beban lingkungan 100 tahunan selama umur operasi.

Penulis mengharapkan saran dan kritik dari para pembaca demi perbaikan dan kesempurnaan penyusunan dan penulisan berikutnya. Semoga Tugas Akhir ini bermanfaat bagi perkembangan teknologi di bidang rekayasa kelautan, bagi pembaca pada umumnya dan bagi penulis sendiri pada khususnya..

Surabaya, Januari 2015

Penulis

## UCAPAN TERIMA KASIH

Penyelesaian Tugas Akhir ini tidak lepas dari bantuan dan dukungan berbagai pihak. Oleh karena itu, pada kesempatan kali ini, penulis ingin menyampaikan ucapan terima kasih kepada:

1. Allah SWT yang telah memberikan petunjuk dan kemudahan sehingga penulis mampu menyelesaikan Tugas Akhir ini tepat pada waktunya,
2. Kedua orang tua penulis dan adek penulis, Brian Sandi yang senantiasa mendoakan dan memberi dukungan baik moril maupun materil,
3. Bapak Yoyok Setyo H. ST.,MT.Ph.D selaku dosen pembimbing pertama yang selalu memberi arahan dan dengan sabar membimbing penulis dalam menyelesaikan tugas akhir ini.
4. Bapak Ir. Joswan JS., MSc. selaku dosen pembimbing kedua yang selalu memberi arahan dan sabar membimbing penulis dalam menyelesaikan tugas akhir ini.
5. Bapak Ir. Murdjito., MSc. selaku dosen wali yang selalu membimbing penulis dalam segala urusan dari awal hingga akhir perkuliahan.
6. Bapak-bapak dosen penguji yang telah memberikan masukan sehingga Tugas Akhir ini dapat terselesaikan dengan baik.
7. Teman-teman seperjuangan Tugas Akhir yang luar biasa, Yani, Eva, Dani, Sekar, dan defi untuk pembelajaran, kerjasama, dan semangatnya selama pengerjaan Tugas akhir ini.
8. Terimakasih untuk Moch Hamzah yang selalu mendukung, membantu, mendoakan dan menemani penulis selama mengerjakan hingga menyelesaikan Tugas Akhir ini.
9. Semua teman-teman Trident yang selalu memberikan dukungan demi terselesaikannya Tugas Akhir ini.
10. Semua pihak yang tidak dapat penulis sebutkan satu persatu yang telah membantu penulis sehingga Tugas Akhir ini dapat selesai tepat pada waktunya.

## DAFTAR ISI

<b>HALAMAN JUDUL .....</b>	<b>i</b>
<b>COVER.....</b>	<b>i</b>
<b>LEMBAR PENGESAHAN .....</b>	<b>iii</b>
<b>ABSTRAK .....</b>	<b>iv</b>
<b>ABSTRACT .....</b>	<b>v</b>
<b>KATA PENGANTAR.....</b>	<b>vi</b>
<b>UCAPAN TERIMA KASIH .....</b>	<b>vii</b>
<b>DAFTAR ISI.....</b>	<b>viii</b>
<b>DAFTAR GAMBAR.....</b>	<b>xi</b>
<b>DAFTAR TABEL .....</b>	<b>xvii</b>
<b>DAFTAR LAMPIRAN .....</b>	<b>xx</b>
<b>BAB I PENDAHULUAN.....</b>	<b>1</b>
1.1. Latar Belakang Masalah .....	1
1.2. Perumusan Masalah .....	4
1.3. Tujuan .....	4
1.4. Manfaat .....	5
1.5. Batasan Masalah .....	5
1.6. Sistematika Penulisan .....	6
<b>BAB II TINJAUAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI .....</b>	<b>9</b>
2.1. Tinjauan Pustaka .....	9
2.2 . Dasar Teori.....	10
2.2.1. <i>Floating Storage and Offloading System (FSO)</i> .....	10
2.2.2. <i>External Turret Mooring</i> .....	10
2.2.3. Teori Gerak Kapal .....	10
2.2.4. Gaya Gelombang.....	12
2.2.5. Heading Kapal Terhadap Arah gelombang.....	13
2.2.6. Gerakan <i>Surge</i> Murni.....	14
2.2.7. Gerakan <i>Sway</i> Murni.....	14
2.2.8. Gerakan <i>Heave</i> Murni .....	15



2.2.9. Gerakan <i>Roll</i> Murni .....	16
2.2.10. Gerakan <i>Pitch</i> Murni.....	17
2.2.11. Gerakan <i>Yaw</i> Murni .....	18
2.2.12. Gerakan <i>Couple Six Degree of Freedom</i> .....	18
2.2.13 Sistem tambat.....	19
2.2.13.1 <i>Turret Mooring System</i> .....	19
2.2.13.2 <i>Tower Yoke Mooring System</i> .....	20
2.2.14 Respon Amplitude Operator (RAO) .....	21
2.2.15 Analisis Dinamis Berbasis Ranah Frekuensi (Frequency Domain Analysis) untuk gerakan struktur kondisi Free Floating .....	22
2.2.16 <i>Spektrum Gelombang</i> .....	22
2.2.17 Dasar Analisis Dinamis.....	22
2.2.18 <i>Analisis Dinamis Berbasis Ranah Waktu</i> ( <i>Time Domain Analysis</i> ).....	25
2.2.19 Tegangan Aksial .....	26
2.2.20 Tegangan Von Misses.....	26
<b>BAB III METODOLOGI PENELITIAN .....</b>	<b>29</b>
3.1. Metodologi Penelitian .....	29
3.2. Prosedur Penelitian.....	31
3.3. Pengumpulan Data .....	33
3.3.1 Sejarah FSO Ladinda .....	33
3.3.2 Data FSO Ladinda.....	35
3.3.3 General Arrangement FSO Ladinda .....	36
3.3.4 Data Lingkungan.....	37
3.3.5 Gambar Drawing Sambungan Yoke Arm dengan Hull Kapal.....	37
3.3.6 Data Yoke Arm .....	38
3.3.7 Data Material Yoke Arm.....	38
<b>BAB IV ANALISIS DAN PEMBAHASAN .....</b>	<b>39</b>
4.1. Pemodelan Struktur.....	39



4.1.1 Pemodelan FSO Ladinda .....	39
4.2. Hidrostatik.....	41
4.3 <i>Lines Plan</i> .....	43
4.4 Analisis Gerakan Kapal .....	44
4.5 Konfigurasi FSO pada saat tertambat .....	46
4.6 <i>Response Amplitude Operator</i> (RAO) .....	47
4.6.1 <i>Response Amplitude Operator</i> (RAO) FSO	
Kondisi Terapung Bebas.....	48
4.6.2 <i>Response Amplitude Operator</i> (RAO) FSO Kondisi Tertambat.....	65
4.7 Spektrum Gelombang .....	83
4.8 Analisis <i>Tension Force</i> .....	86
4.9 Konstruksi Sambungan Yoke Arm dengan FSO .....	88
4.10 <i>Meshing</i> dan <i>Sensitivity Analysis</i> .....	90
4.13 Analisis Tegangan Lokal Konstruksi Sambungan Yoke Arm	
dengan FSO Ladinda.....	92
<b>BAB V PENUTUP .....</b>	<b>97</b>
5.1. Kesimpulan .....	97
5.2. Saran.....	98
<b>DAFTAR PUSTAKA .....</b>	<b>99</b>
<b>LAMPIRAN</b>	
<b>BIODATA PENULIS</b>	



## DAFTAR GAMBAR

<b>Gambar 1.1</b> FSO Ladinda .....	2
<b>Gambar 1.2</b> Tower Yoke Mooring System .....	3
<b>Gambar 1.3</b> Sambungan <i>Yoke Arm Eksternal Turret Mooring System</i> dengan FSO Ladinda.....	3
<b>Gambar 2.1</b> <i>Enam derajat kebebasan</i> .....	11
<b>Gambar 2.2</b> <i>Definisi arah gelombang terhadap</i> <i>heading kapal</i> .....	14
<b>Gambar 2.3</b> Ilustrasi gerakan heave .....	15
<b>Gambar 2.4</b> Ilustrasi Kondisi kapal pada saat <i>still water</i> .....	17
<b>Gambar 2.5</b> Ilustrasi kondisi pitch.....	18
<b>Gambar 2.6</b> Turret Mooring System .....	20
<b>Gambar 2.7</b> <i>Tower Yoke Mooring System</i> .....	21
<b>Gambar 2.8</b> Ilustrasi tegangan normal akibat gaya aksial (+)tarik dan (-)tekan .....	26
<b>Gambar 3.1</b> Flowchart penyelesaian Tugas Akhir .....	30
<b>Gambar 3.2</b> Mooring wishborn arm system attach to tripod SPOLS (Single Point Offshore Loading System) .....	34
<b>Gambar 3.3</b> <i>General Arrangement</i> FSO Ladinda.....	36
<b>Gambar 3.4</b> Sambungan <i>Yoke Arm</i> dilihat dari Atas .....	37
<b>Gambar 3.5</b> Sambungan <i>Yoke Arm</i> dilihat dari samping.....	37
<b>Gambar 4.1</b> Hasil pemodelan FSO Ladinda pada Maxsurf tampak Isometric.....	40
<b>Gambar 4.2</b> Hasil pemodelan FSO Ladinda pada Maxsurf tampak depan .....	40
<b>Gambar 4.3</b> Hasil pemodelan FSO Ladinda pada Maxsurf tampak samping .....	41



<b>Gambar 4.4</b> Hasil pemodelan FSO Ladinda pada Maxsurf	
tampak atas.....	41
<b>Gambar 4.5</b> Lines Plan FSO Ladinda .....	44
<b>Gambar 4.6</b> Model FSO Ladinda pada Ansys .....	45
<b>Gambar 4.7</b> <i>Joint Hinged</i> .....	46
<b>Gambar 4.8</b> Konfigurasi FSO tertambat.....	46
<b>Gambar 4.9</b> Simulasi pemodelan tertambat dengan <i>joint hinged</i>	
Dengan Ansys Aqw .....	47
<b>Gambar 4.10</b> Grafik RAO 0° translasi FSO <i>full load</i>	
saat <i>free floating</i> .....	48
<b>Gambar 4.11</b> Grafik RAO 0° rotasi FSO <i>full load</i>	
saat <i>free floating</i> .....	49
<b>Gambar 4.12</b> Grafik RAO 45° translasi FSO <i>full load</i> .	
saat <i>free floating</i> .....	50
<b>Gambar 4.13</b> Grafik RAO 45° rotasi FSO <i>full load</i>	
saat <i>free floating</i> .....	51
<b>Gambar 4.14</b> Grafik RAO 90° translasi FSO <i>full load</i>	
saat <i>free floating</i> .....	52
<b>Gambar 4.15</b> Grafik RAO 90° rotasi FSO <i>full load</i>	
saat <i>free floating</i> .....	53
<b>Gambar 4.16</b> Grafik RAO 180° translasi FSO <i>full load</i>	
saat <i>free floating</i> .....	54
<b>Gambar 4.17</b> Grafik RAO 180° rotasi FSO <i>full load</i>	
saat <i>free floating</i> .....	55
<b>Gambar 4.18</b> Grafik RAO 0° translasi FSO <i>light load</i>	
saat <i>free floating</i> .....	57



<b>Gambar 4.19</b> Grafik RAO 0° rotasi FSO <i>light load</i>	
<i>saat free floating</i> .....	58
<b>Gambar 4.20</b> Grafik RAO 45° translasi FSO <i>light load</i>	
<i>saat free floating</i> .....	59
<b>Gambar 4.21</b> Grafik RAO 45° rotasi FSO <i>light load</i>	
<i>saat free floating</i> .....	60
<b>Gambar 4.22</b> Grafik RAO 90° translasi FSO <i>light load</i>	
<i>saat free floating</i> .....	61
<b>Gambar 4.23</b> Grafik RAO 90° rotasi FSO <i>light load</i>	
<i>saat free floating</i> .....	62
<b>Gambar 4.24</b> Grafik RAO 180° translasi FSO <i>light load</i>	
<i>saat free floating</i> .....	63
<b>Gambar 4.25</b> Grafik RAO 180° rotasi FSO <i>light load</i>	
<i>saat free floating</i> .....	63
<b>Gambar 4.26</b> Grafik RAO 0° translasi FSO <i>full load</i>	
<i>saat mooring</i> .....	66
<b>Gambar 4.27</b> Grafik RAO 0° rotasi FSO <i>full load</i>	
<i>saat mooring</i> .....	67
<b>Gambar 4.28</b> Grafik RAO 45° translasi FSO <i>full load</i>	
<i>saat mooring</i> .....	68
<b>Gambar 4.29</b> Grafik RAO 45° rotasi FSO <i>full load</i>	
<i>saat mooring</i> .....	69
<b>Gambar 4.30</b> Grafik RAO 90° translasi FSO <i>full load</i>	
<i>saat mooring</i> .....	70
<b>Gambar 4.31</b> Grafik RAO 90° rotasi FSO <i>full load</i>	
<i>saat mooring</i> .....	71



<b>Gambar 4.32</b> Grafik RAO 180° translasi FSO <i>full load</i>	
saat <i>mooring</i> .....	72
<b>Gambar 4.33</b> Grafik RAO 180° rotasi FSO <i>full load</i>	
saat <i>mooring</i> .....	73
<b>Gambar 4.34</b> Grafik RAO 0° translasi FSO <i>full load</i>	
saat <i>mooring</i> .....	74
<b>Gambar 4.35</b> Grafik RAO 0° rotasi FSO <i>light load</i>	
saat <i>mooring</i> .....	76
<b>Gambar 4.36</b> Grafik RAO 45° translasi FSO <i>light load</i>	
saat <i>mooring</i> .....	77
<b>Gambar 4.37</b> Grafik RAO 45° rotasi FSO <i>light load</i>	
saat <i>mooring</i> .....	78
<b>Gambar 4.38</b> Grafik RAO 90° translasi FSO <i>light load</i>	
saat <i>mooring</i> .....	79
<b>Gambar 4.39</b> Grafik RAO 90° rotasi FSO <i>light load</i>	
saat <i>mooring</i> .....	80
<b>Gambar 4.40</b> Grafik RAO 180° translasi FSO <i>light load</i>	
saat <i>mooring</i> .....	81
<b>Gambar 4.41</b> Grafik RAO 180° rotasi FSO <i>light load</i>	
saat <i>mooring</i> .....	82
<b>Gambar 4.42</b> Spektrum Jonswap perairan Selat Malaka .....	84
<b>Gambar 4.43</b> Grafik Respon Spektra translasi FSO <i>full load</i>	
saat <i>free floating</i> .....	85
<b>Gambar 4.44</b> Grafik Respon Spektra rotasi FSO <i>full load</i>	
saat <i>free floating</i> .....	85
<b>Gambar 4.45</b> Hasil pemodelan sambungan <i>yoke arm</i> dan FSO pada	
Autocad-tampak isometri .....	88



<b>Gambar 4.46</b> Hasil pemodelan sambungan <i>yoke arm</i> dan FSO pada	
Autocad-tampak atas .....	88
<b>Gambar 4.47</b> Hasil pemodelan sambungan <i>yoke arm</i> dan FSO pada	
Autocad-tampak samping.....	89
<b>Gambar 4.48</b> Material property untuk pemodelan struktur global .....	89
<b>Gambar 4.49</b> Model dengan meshing sambungan <i>yoke arm</i>	
dengan hull FSO.....	90
<b>Gambar 4.50</b> Sensitivity model konstruksi sambungan <i>yoke arm</i> .....	91
<b>Gambar 4.51</b> Tegangan maksimum pada konstruksi sambungan	
Sambungan <i>yoke arm</i> dengan FSO Ladinda .....	94
<b>Gambar 4.52</b> Deformasi maksimum pada konstruksi sambungan	
<i>Yoke arm</i> dengan FSO Ladinda.....	94
<b>Gambar 4.53</b> Deformasi pada konstruksi sambungan <i>yoke arm</i> dengan	
Hull FSO Ladinda .....	94
<b>Gambar 4.54</b> Deformasi pada konstruksi sambungan <i>yoke arm</i> dengan	
Pengait <i>yoke arm</i> .....	95



## DAFTAR TABEL

<b>Tabel 3.1.</b> Ukuran Utama FSO Ladinda .....	29
<b>Tabel 3.2.</b> Data Lingkungan .....	30
<b>Tabel 3.3</b> Data <i>Yoke Arm</i> .....	31
<b>Tabel 3.4</b> Data Material <i>Yoke Arm</i> .....	31
<b>Tabel 4.1</b> Ukuran utama( <i>principal dimention</i> )FSO Ladinda .....	40
<b>Tabel 4.2</b> Validasi data hidrostatik FSO Ladinda <i>full load</i> .....	42
<b>Tabel 4.3</b> Validasi data hidrostatik FSO Ladinda <i>full load</i> .....	43
<b>Tabel 4.4</b> Data titik berat dan <i>radius gyration</i> pada FSO Ladinda .....	44
<b>Tabel 4.5</b> Data Lingkungan .....	45
<b>Tabel 4.6</b> Nilai maksimum RAO FSO Ladinda terapung bebas <i>full load condition</i> .....	56
<b>Tabel 4.7</b> Nilai maksimum RAO FSO Ladinda terapung bebas <i>light load condition</i> .....	65
<b>Tabel 4.8</b> Nilai maksimum RAO FSO Ladinda tertambat <i>full load condition</i> .....	74
<b>Tabel 4.9</b> Nilai maksimum RAO FSO Ladinda tertambat <i>full load condition</i> .....	83
<b>Tabel 4.10</b> Hasil simulasi <i>tension force</i> pada arah pembebanan 0° .....	87
<b>Tabel 4.11</b> Hasil simulasi <i>tension force</i> pada arah pembebanan 45° .....	87
<b>Tabel 4.12</b> Hasil simulasi <i>tension force</i> pada arah pembebanan 90° .....	87
<b>Tabel 4.13</b> Hasil simulasi <i>tension force</i> pada arah pembebanan 180° .....	87



**Tabel 4.14** Hasil perhitungan *tension force* pada *yoke arm* .....88

**Tabel 4.13** Tabulasi hasil maximum *von mises stress* untuk variasi

Kerapatan *meshing* .....91



## **DAFTAR LAMPIRAN**

LAMPIRAN A	DATA DAN MODEL STRUKTUR FSO Ladinda DAN YOKE ARM
LAMPIRAN B	PERHITUNGAN RESPON SPEKTRA DAN GRAFIK RESPON SPEKTRA
LAMPIRAN C	HASIL ANALISA TEGANGAN LOKAL MAKSIMUM YOKE ARM FSO Ladinda



# BAB I

## PENDAHULUAN

### 1.1 Latar Belakang Masalah

Pada perairan tertentu terdapat sumber minyak dan gas alam biasanya mempunyai volume Antara kecil hingga sedang dan berada pada lokasi yang terpisah-pisah. Sehingga menjadikan suatu lokasi tersebut tidak ekonomis lagi untuk menggunakan anjungan terpancang dan eksplorasinya. Oleh sebab itu, pemilihan anjungan terapung adalah hal yg tepat untuk dipilih. Salah satunya adalah FSO yang dioperasikan diladang sumur yang ada. FSO (*Floating Storage and Offloading*) merupakan salah satu struktur terapung yang saat ini mulai banyak digunakan yang berfungsi sebagai storage minyak dan gas yang nantinya akan ditransfer ke tanker. FSO dirancang sebagai suatu struktur yang lebih efektif jika dibandingkan dengan struktur terpancang(*fixed*) karena struktur tersebut terapung sehingga dapat dipindahkan dari lokasi satu ke lokasi lainnya.

Pergerakan bangunan terapung sangat dipengaruhi oleh beban lingkungan, khususnya beban gelombang. Gerakan kapal yang terjadi akibat beban-beban tersebut juga mempengaruhi posisi dari kapal sehingga saat beroperasi dibutuhkan system tambat untuk mempertahankan FSO agar tetap pada posisinya.

Salah satu FSO yang beroperasi di Indonesia adalah FSO *Ladinda* yang merupakan kapal hasil konversi dari kapal tanker pada tahun 1974 yang di modifikasi fungsi sebagai FSO pada tahun 1984. Sejak tahun 1984 kapal koversi ini mulai beroperasi di Selat Lalang, Malaka Strait, Riau(Athoillah, 2014). Seperti pada gambar 1.1 FSO ini dalam beoperasi di lapangan di tambat dengan menggunakan *tower yoke* mooring system berupa SPOLS (*Single Point Offshore Loading System*) untuk operasional offloading menggunakan system *side by side*.





**Gambar 1.1** FSO *Ladinda*

(Sumber : [www.energi-mp.com](http://www.energi-mp.com))

Sistem tambat yang digunakan pada FSO harus dapat menahan beban lingkungan terutama beban gelombang. Sistem tambat yang sering digunakan adalah SPM (*Single Point Mooring*). SPM merupakan salah satu tipe dari jenis tambatan yang mengikuti dari kondisi lingkungan yang ada sehingga operasi FSO dapat bergerak sesuai dengan kondisi lingkungan yang ada dilapangan dan tetap tertambat. . Sistem mooring SPM yang sering digunakan pada FSO yaitu SALM (*Single Anchored Leg Mooring*), CALM (*Catenary Anchored Leg Mooring*), dan *Turret Mooring*.

Pada kasus ini FSO *Ladinda* menggunakan system tambat yaitu SPM yang berjenis External Turret Mooring System yang menggunakan system tambat *Tower Yoke* yang berada pada bagian depan kapal. Bisa dilihat pada gambar 1.2 *Tower Yoke* mooring system dengan mooring tower sebagai system tambatnya yang dihubungkan dengan *yoke arm* dan turntable yang membuat FSO terkunci tetap bergerak sesuai dengan gerakan gelombang tanpa membuat FSO itu terlepas.

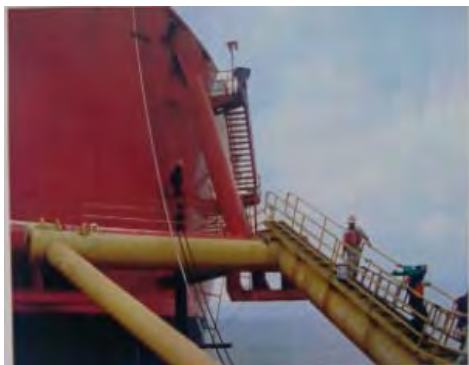




**Gambar 1.2** Tower Yoke Mooring System FSO Ladinda

(sumber : [www.energi-mp.com](http://www.energi-mp.com))

Pada gambar 1.3 dapat dilihat *External turret* ini terdapat connection structure yang tersambung secara langsung pada bagian *bow hull* dari FSO, dimana pada bagian ini tentunya harus mampu menahan beban-beban yang bekerja pada FSO. Dengan mengetahui gerakan dari FSO terhadap beban gelombang, maka dapat diketahui besar tegangan yang terjadi pada sambungan FSO dan *yoke arm*, karena itu jika pada bagian ini mengalami kegagalan maka kegiatan operasional akan terhenti dan tentunya menyebabkan kerugian yang besar.



(Sumber : PT Energi Mega Persada)

(a)



(Sumber : PT Energi Mega Persada)

(b)



(Sumber : PT Energi Mega Persada)

(c)

**Gambar 1.3** Sambungan *Yoke Arm External turret Mooring System* dengan FSO Ladinda

(a)yoke arm kanan (b) yoke arm kiri (c)Yoke arm pada stern hull

Berdasarkan latar belakang yang dijelaskan diatas, pada tugas akhir ini akan dilakukan analisis untuk menghitung kekuatan sambungan dari struktur *yoke arm* pada *external turret mooring system* dari FSO *Ladinda* untuk mendapatkan nilai tegangan maksimum dari sambungan konstruksi *Yoke Arm External Turret Mooring System* dengan FSO *Ladinda*.

## 1.2 Perumusan Masalah

1. Bagaimana perilaku gerakan FSO *Ladinda* saat *free floating* ?
2. Bagaimana perilaku gerakan FSO *Ladinda* saat *tertambat* ?
3. Berapa besar tegangan lokal maksimum pada konstruksi *yoke arm* FSO *Ladinda* ?



### 1.3 Tujuan

Tujuan dari tugas akhir ini adalah :

1. Menghitung perilaku gerak FSO Ladinda saat *free floating*
2. Menghitung perilaku gerak FSO *Ladinda* saat tertambat
3. Menghitung besar tegangan lokal maksimum yang terjadi pada sambungan konstruksi *yoke arm* dengan hull FSO Ladinda akibat pengaruh gerakan struktur .

### 1.4 Manfaat Penelitian

Manfaat dari tugas akhir ini adalah:

1. Dapat mengetahui cara menganalisa dan menghitung karakteristik respon pada struktur FSO *Ladinda* saat *free floating* dan tertambat.
2. Dapat mengetahui prosedur cara menganalisis dan menghitung kekuatan struktur dari sambungan *yoke arm external turret mooring* pada FSO.

### 1.5 Batasan Masalah

1. Struktur yang dianalisa adalah sambungan *yoke arm eksternal turret mooring system* dengan FSO Ladinda.
2. Lokasi dari FSO Ladinda berada di sekitar perairan Selat Lalang, Malaka, Riau dengan kedalaman 25 meter.
3. FSO Ladinda bersifat *weathervaning*.
4. Hanya dilakukan permodelan pada *hull bagian depan* FSO Ladinda yang mendukung konstruksi sambungan *yoke arm*.
5. Pemodelan dan analisa lokal dilakukan sebatas pada konstruksi bagian depan kapal dan sambungan *yoke arm* dari *external turret mooring system* FSO Ladinda.
6. *Collision Bulkhead* tidak dimodelkan.
7. Analisa perilaku gerak dilakukan dalam dua kondisi yaitu saat kondisi *full load* dan *light load*.
8. Beban gelombang yang digunakan adalah beban saat kondisi *ekstrim* (badai).

9. Beban – beban yang ditinjau sebagai perhitungan tegangan pada struktur adalah beban gelombang, beban arus, dan beban angin.
10. *Heading* pembebanan pada *heading* angle  $0^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $90^\circ$ ,  $180^\circ$ .
11. Analisa dinamis menggunakan metode analisis *time domain*.
12. Analisa untuk mengetahui gerakan respon struktur pada FSO *Ladinda* saat *free floating* dan tertambat pada SPOLS menggunakan maxsurf 20 dan Ansys Aqw, sedangkan analisa lokal pada sambungan *yoke arm external turret mooring system* dengan FSO *Ladinda* yang bertujuan untuk mendapatkan tegangan lokal menggunakan ANSYS Workbench 16.

## **1.6 Sistematika Penulisan**

Sistematika penulisan tugas akhir ini adalah sebagai berikut:

### **BAB I PENDAHULUAN**

Pada Bab ini menjelaskan tentang latar belakang tugas akhir yang akan dilakukan, perumusan masalah, tujuan yang hendak dicapai dalam penulisan tugas akhir ini, manfaat yang diperoleh dan ruang lingkup penelitian guna membatasi analisis yang akan dilakukan dalam tugas akhir ini;

### **BAB II TINJAUAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI**

Dalam penulisan tugas akhir ini, penulis berpedoman pada penelitian, jurnal serta buku-buku yang membahas tentang olah gerak bangunan apung, teori gelombang, eksitasi gelombang, respons struktur, dan bahan-bahan lain yang mendukung penelitian ini;

### **BAB III METODOLOGI PENELITIAN**

Pada bab ini menjelaskan tentang metode pengerjaan dalam tugas akhir yang akan dilakukan beserta prosedur yang digunakan.

### **BAB IV ANALISIS DAN PEMBAHASAN**

Pada bab ini akan dilakukan analisis mengenai hasil pemodelan FSO dengan menggunakan *software* Maxsurf 20 untuk mengetahui hidrostatik struktur dan



analisis gerakan FSO pada saat terapung bebas. Selain itu, menggunakan *software* Ansys AQWA 16.0 untuk analisis gerakan FSO pada saat tertambat dan mengetahui besar *tension force* pada yoke arm \, serta menggunakan *software* Ansys Workbench 16 untuk permodelan lokal dari konstruksi sambungan yoke arm dengan FSO. Selain hal tersebut, juga dilakukan pembahasan analisis hasil permodelan yang telah dilakukan pada penelitian ini.

## **BAB V PENUTUP**

Pada bab ini menjelaskan tentang kesimpulan dari hasil Analisis dan pembahasan serta berisi saran-saran untuk penelitian ataupun tugas akhir selanjutnya.

*(Halaman ini sengaja dikosongkan)*



## **BAB II**

### **TINJAUAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI**

#### **2.1 Tinjauan Pustaka**

Pengembangan teknologi pertambangan minyak telah banyak yang beralih dari laut dangkal menuju laut dalam yaitu lebih dari 2000 meter. Sistem yang biasa diterapkan pada laut dalam terdiri dari *Compliant Tower (CT)*, *Conventional Tension Leg Platform (TLP)*, mini-TLP, semi-FPS(*Floating production system*), *truss SPAR*, *Classic Spar*, *Control Bouy(CB)*, dan unit FPSO (*Floating Production Storage and Offloading*). Pada perairan tertentu sumber minyak dan gas alam biasanya mempunyai volume antara kecil hingga sedang dan berada pada lokasi yng terpisah-pisah. Sehingga menjadikan lokasi ini tidak ekonomis lagi untuk menggunakan anjungan terpancang dalam eksplorasinya. Oleh karena itu pemilihan anjungan terapung adalah paling tepat, salah satunya adalah FPSO.

FPSO adalah struktur apung lambung tunggal berbentuk kapal atau tongkang yang difungsikan sebagai fasilitas untuk mengakomodasi aktivitas produksi migas dan sekaligus menyimpannya dalam tanki-tanki dilambungny sebelum produk tersebut ditransfer ke kapal-kapal tanki pengangkut untuk didistribusikan ke pasaran. FPSO mempunyai karakteristik untuk bergerak mengikuti kondisi lingkungannya (gerakan gelombang, angin atau arus). Oleh karena itu, untuk menjaga FPSO supaya tetap pada posisinya maka diperlukan adanya system tambat.

Seringkali FPSO tersebut secara permanen ditambatkan ke dasar laut tempat ia beroperasi dengan menggunakan rantai (*mooring*). Konfigurasi sistem tambatnya bisa berupa jenis tambat menyebar (*spread mooring*) dan jenis tambat titik tunggal (*single point mooring*) (API RP 2SK, 2005).

## 2.2 Dasar Teori

### 2.2.1 FSO (*Floating Storage and Offloading*)

FSO (*Floating Storage and Offloading System*) merupakan struktur terapung yang berfungsi menyimpan dan menyalurkan minyak dan gas bumi tanpa dilengkapi dengan fasilitas pemrosesan. Menurut *OCIMF Tandem Mooring Offloading Guidelines for CTs at F(P)SO Facilities*, FSO serupa dengan FPSO, yang membedakan hanya minyak atau gas tidak diproses di kapal. Jadi, FSO dapat didefinisikan sebagai suatu sistem terapung yang beroperasi untuk:

- a. Menerima hasil proses *crude oil* atau gas dari fasilitas pemrosesan eksternal.
- b. Menyimpan *crude oil* yang telah diproses.
- c. Menyalurkan *crude oil* atau gas ke *shuttle tanker*.

### 2.2.2 *External Turret Mooring*

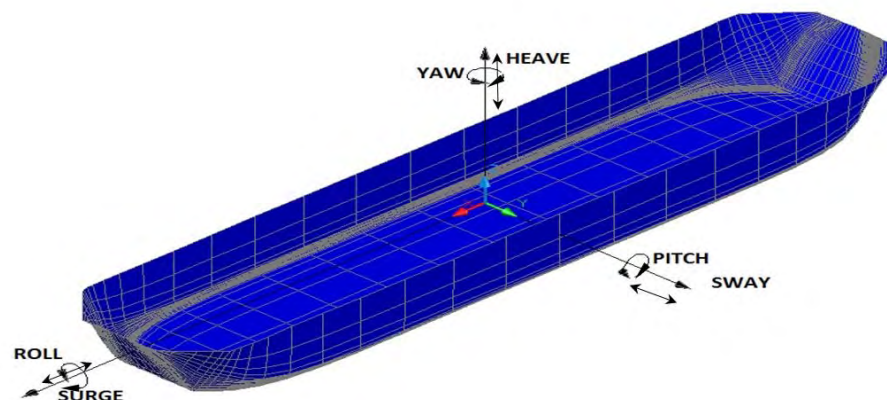
Untuk menjaga FSO berada pada posisinya, maka harus dibuat suatu system tambat. Konfigurasi system tambat FSO bias berupa jenis tambat menyebar (*Spread Mooring*) dan system tambat titik tunggal (*Single Point Mooring*), tetapi pada umumnya berbentuk system tambat *turret* (*Turret Mooring System*) (Prastianto, 2006). Sistem *turret mooring* didefinisikan sebagai system tambat dimana jumlah kaki *catenary mooring* yang dipasang pada turret merupakan bagian penting dari FSO yang ditambat. *Turret* terdiri atas *bearings* yang menyebabkan kapal bisa berputar disekitar kaki jangkar. Sistem *turret* ini memberikan kemampuan kepada FSO terhadap *watherave* sehingga didapatkan sebuah posisi dimana beban-beban lingkungan seperti arus, gelombang dan angin disekitar mooring menjadi kecil.



### 2.2.3 Teori Gerak Kapal

Setiap struktur apung yang bergerak di atas permukaan laut selalu mengalami gerakan osilasi. Gerakan osilasi ini terdiri enam macam gerakan dengan tiga gerakan translasional dan tiga gerakan rotasional dalam tiga arah. Seperti pada gambar 2.1 Macam-macam gerakan ini meliputi:

- Surging* : Gerak osilasi translasional pada sumbu-x
- Swaying*: Gerak osilasi translasional terhadap sumbu-y
- Heaving*: Gerak osilasi translasional terhadap sumbu-z
- Rolling* : Gerak osilasi rotasional terhadap sumbu-x
- Pitching*: Gerak osilasi rotasional terhadap sumbu-y
- Yawing* : Gerak osilasi rotasional terhadap sumbu-z



**Gambar 2.1** Enam derajat kebebasan pada kapal

(Sumber: Wahyudi, 2009)

Hanya tiga macam gerakan yang merupakan gerakan osilasi murni yaitu *heaving*, *rolling*, dan *pitching*, karena gerakan ini bekerja di bawah gaya atau momen pengembali ketika struktur tersebut dari posisi kesetimbangannya. Untuk gerakan, *surging*, *swaying*, dan *yawing*, struktur tidak kembali menuju posisi kesetimbangannya semula, kecuali terdapat gaya atau momen pengembali yang menyebabkannya bekerja dalam arah berlawanan.

#### 2.2.4 Gaya Gelombang

Syarat pemilihan teori untuk perhitungan gaya gelombang didasarkan pada perbandingan antara diameter struktur ( $D$ ) dengan panjang gelombang ( $\lambda$ ) sebagai berikut:

$\frac{D}{\lambda} > 1$  = gelombang mendekati pemantulan murni, persamaan morison tidak valid

$\frac{D}{\lambda} > 0.2$  = difraksi gelombang perlu diperhitungkan, persamaan morison tidak valid

$\frac{D}{\lambda} < 0.2$  = persamaan morison valid

Indiyono (2003) menjelaskan beberapa teori yang digunakan pada perhitungan gaya gelombang, diantaranya yaitu :

a. Teori Morison

Persamaan morison mengasumsikan bahwa gelombang terdiri dari komponen gaya inersia dan *drag force* (hambatan) yang dijumlahkan secara linier. Persamaan morison lebih tepat diterapkan pada kasus struktur dimana gaya hambatan merupakan komponen yang dominan. Hal ini biasanya dijumpai pada struktur yang ukurannya ( $D$ ) relatif kecil dibandingkan dengan panjang gelombangnya ( $\lambda$ ).

b. Teori *Froude-Krylov*

*Froude-Krylov* digunakan bilamana gaya hambatan relatif kecil dan gaya inersia dianggap lebih berpengaruh, dimana struktur dianggap kecil. Teori ini mengadopsi metode tekanan gelombang *incident* dan bidang tekanan pada permukaan struktur. Keuntungan dari teori ini adalah untuk struktur yang simetris, perhitungan gaya dapat



dilakukan dengan persamaan terangkai (*closed-form*) dan koefisien-koefisien gayanya mudah ditentukan.

c. Teori Difraksi

Bilamana suatu struktur mempunyai ukuran yang relatif besar, yakni memiliki ukuran yang kurang lebih sama dengan panjang gelombang, maka keberadaan struktur ini akan mempengaruhi timbulnya perubahan arah pada medan gelombang disekitarnya. Dalam hal ini difraksi gelombang dari permukaan struktur harus diperhitungkan dalam evaluasi gaya gelombang.

### 2.2.5 Heading Kapal terhadap Arah Gelombang

Selain faktor gelombang, terdapat juga faktor gelombang papasan, dimana gelombang tersebut berpapasan terhadap kapal. Dalam ilustrasinya di perhatikan sebagai berikut :

$$T_{\theta} = \frac{L_w}{V_w - V \cos \mu} \quad (2.1)$$

$$V_w = \omega_{\theta} \left(1 - \frac{V}{V_w} \cos \mu\right) \quad (2.2)$$

dengan:

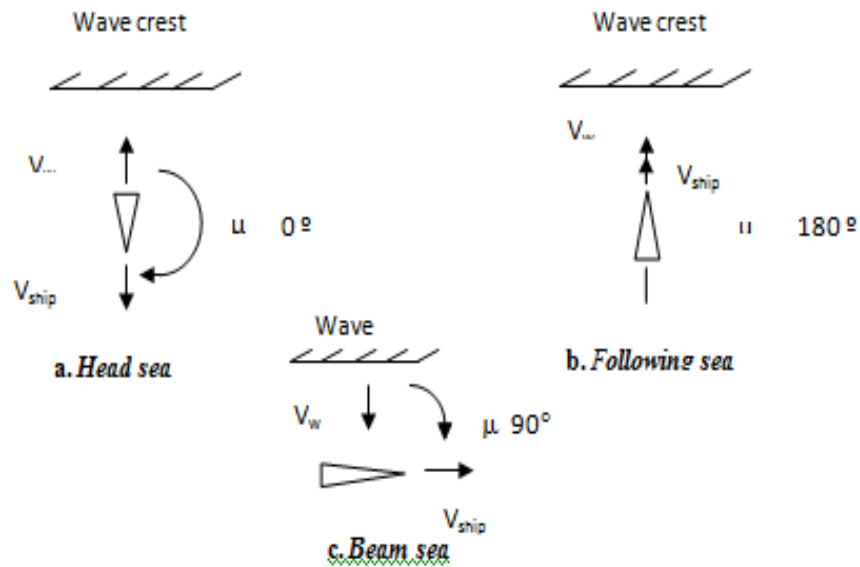
$T_{\theta}$  = Periode *Encountering* (s)

$V_w$  = Kecepatan Gelombang ( $m/s$ )

$V$  = Kecepatan Kapal (*knot*)

$\mu$  = Sudut Datang Gelombang

Sebagai gambaran arah kapal terhadap arah gelombang untuk kondisi *Head Sea*, *Following Sea*, *Beam Sea* dapat dilihat pada gambar 2.2 di bawah ini :



**Gambar 2.2** Definisi arah datang gelombang terhadap heading kapal  
(Sumber: Bhattacharyya 1972)

### 2.2.6 Gerakan Surge Murni

*Surge* merupakan gerak translasi kapal dengan sumbu X sebagai pusat gerak. Persamaan umum pada kapal kondisi *surging* adalah:

$$a\ddot{x} + b\dot{x} + cx = F_o \cos \omega_e t \quad (2.3)$$

dengan:

$a\ddot{x}$  : Inertial force

$b\dot{x}$  : Damping force

$cx$  : Restoring force

$F_o \cos \omega_e t$  : Exciting force

### 2.2.7 Gerakan Sway Murni

*Sway* merupakan gerak translasi kapal dengan sumbu Y sebagai pusat gerak. Persamaan umum kapal pada kondisi *swaying* adalah:

$$a\ddot{y} + b\dot{y} + cy = F_o \cos \omega_e t \quad (2.4)$$

dengan:

$a\ddot{y}$  : Inertial force



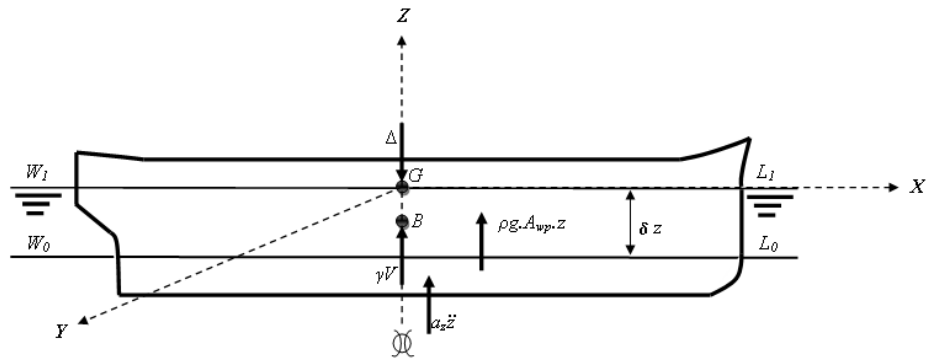
$b\dot{y}$  : Damping force

$cy$  : Restoring force

$F_o \cos \omega_e t$  : Exciting force

### 2.2.8 Gerakan Heave Murni

Pada *heaving* gaya ke bawah akibat dari berat kapal membuat kapal tercelup ke air lebih dalam dan kembali ke awal hingga diperoleh kesetimbangan kapal. Ketika gaya *buoyancy* lebih besar akibat kapal tercelup, kapal akan bergerak vertikal ke atas, ketika posisi kapal telah setimbang kapal akan tetap naik dikarenakan ada pengaruh momentum. Dapat dilihat pada gambar 2.3 di bawah ini :



**Gambar 2.3** Ilustrasi gerakan *heave*

(Sumber: Murtedjo 1999)

Dengan keterangan gambar sebagai berikut:

$\Delta$  : Displacement kapal

G : Titik tangkap gaya berat ( Titik Berat )

B : Titik tangkap gaya tekan keatas ( Titik *Bouyancy* )

$\gamma V$  : Gaya tekan keatas

$W_0L_0$  : Water line keadaan awal

$W_1L_1$  : Water line keadaan *heave*

$a_z \ddot{z}$  : Tambahan gaya tekan keatas karena *added mass*

$\delta_z$  : Besar jarak simpangan *heave*

Maka dapat dituliskan persamaan umum pada kapal kondisi heaving adalah :

$$a\ddot{z} + b\dot{z} + cz = F_o \cos \omega_e t \quad (2.5)$$

dengan:

$a\ddot{z}$  : *Inertial force*

$b\dot{z}$  : *Damping force*

$cz$  : *Restoring force*

$F_o \cos \omega_e t$  : *Exciting force*

### 2.2.9 Gerakan *Roll Murni*

Kapal menjalani gerakan harmonis sederhana terhadap koordinat axis secara transversal maupun longitudinal. *Rolling* merupakan gerak rotasional dengan sumbu X sebagai pusat geraknya. Gerakan ini akan berpengaruh terhadap initial velocity sehingga perlu dilakukan perhitungan terhadap momen gaya. Dapat dilihat pada gambar 2.4 adalah ilustrasi dari gerakan *rolling*. Rumus umum dari persamaan gerak akibat *rolling* ialah:

$$a\ddot{\phi} + b\dot{\phi} + c\phi = M_o \cos \omega_e t \quad (2.6)$$

Dengan:

$M_o$  = Amplitudo momen eksitasi (m)

$\omega_e$  = Frekuensi gelombang *encountering* (rad/s)

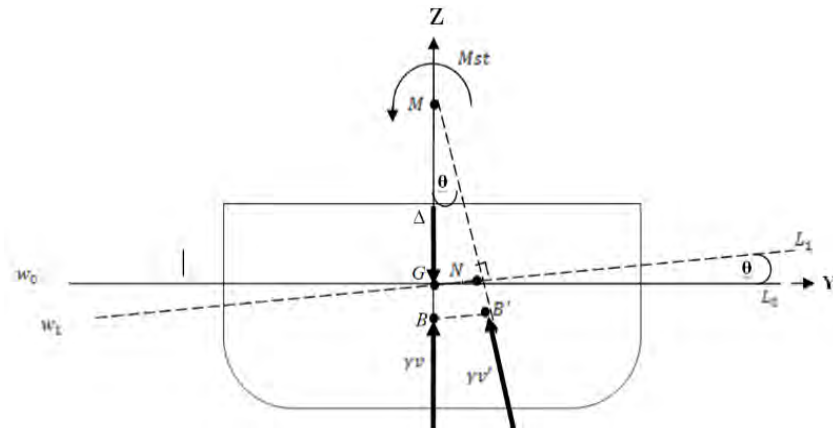
$a\ddot{\phi}$  = *Inertial moment*

$b\dot{\phi}$  = *Damping Moment*

$c\phi$  = *Restoring Moment*

$M_o \cos \omega_e t$  = *Exciting moment*





**Gambar 2.4** Ilustrasi kondisi *rolling* kapal pada saat *still water*  
(Sumber: Murtedjo 1999)

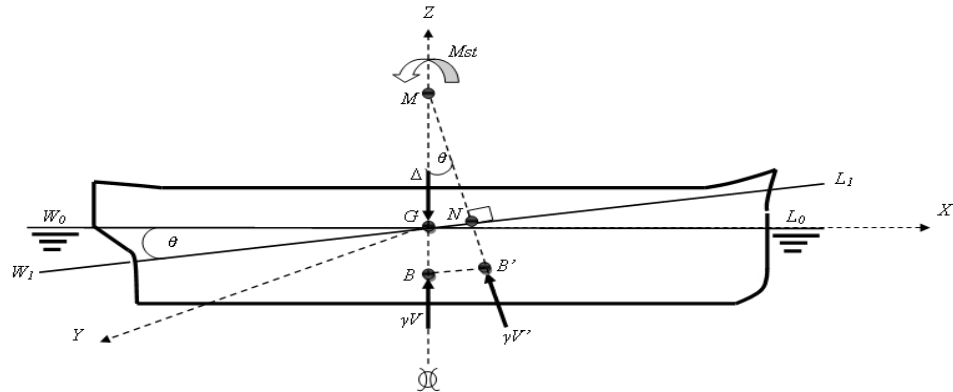
### 2.2.10 Gerakan *Pitch* Murni

Konstruksi benda apung dapat mengalami *simple harmonic motion* yang berupa gerakan dalam arah sumbu transversal maupun arah sumbu longitudinal apabila benda apung tersebut mengalami perpindahan posisi keseimbangannya dan kemudian dilepaskan atau pada benda apung tersebut dikenakan suatu kecepatan awal sehingga bergerak menjauh dari posisi keseimbangannya. *Pitching* merupakan gerak rotasional dengan sumbu Y sebagai pusat gerak. Karena gerak *pitching* akan berpengaruh terhadap kesetimbangan posisi, maka momen yang terjadi akibat *pitching* perlu diperhitungkan. Dapat dilihat pada gambar 2.5 adalah ilustrasi dari gerakan *pitching*. Rumus umum dari persamaan gerakan akibat *pitching* adalah:

$$a\ddot{\theta} + b\dot{\theta} + c\theta = M_o \cos \omega_e t \quad (2.7)$$

dengan:

$M_o$	= amplitudo momen eksitasi (m)
$\omega_e$	= frekuensi gelombang <i>encountering</i> (rad/s)
$a\ddot{\theta}$	= <i>Inertial Moment</i>
$b\dot{\theta}$	= <i>Damping Moment</i>
$c\theta$	= <i>Restoring Moment</i>
$M_o \cos \omega_e t$	= <i>Exciting Moment</i>



**Gambar 2.5** Ilustrasi kondisi *pitch*

(Sumber: Murtedjo 1999)

### 2.2.11 Gerakan Yaw Murni

Gerak *yaw* merupakan gerak rotasional kapal dengan sumbu Z sebagai pusat gerak. Sama halnya seperti pada gerak *rolling* dan *pitching*, gerak ini pun akan berpengaruh terhadap kesetimbangan posisi kapal, sehingga perlu memperhitungkan momen gaya. Persamaan umum gerak kapal untuk *yawing* ialah:

$$a\ddot{\phi} + b\dot{\phi} + c\phi = M_o \cos \omega_e t \quad (2.8)$$

dengan:

$M_o$  = amplitudo momen eksitasi (m)

$\omega_e$  = frekuensi gelombang *encountering* (rad/s)

$a\ddot{\phi}$  = *Inertial Moment*

$b\dot{\phi}$  = *Damping Moment*

$c\phi$  = *Restoring Moment*

$M_o \cos \omega_e t$  = *Exciting Moment*

### 2.2.12 Gerakan Couple Six Degree of Freedom

Karena bangunan apung yang ditinjau terdiri dari enam mode gerakan bebas (*six degree of freedom*), dengan asumsi bahwa gerakan-gerakan osilasi tersebut adalah linier dan harmonik, maka persamaan diferensial gerakan kopel dapat dituliskan sebagai berikut:



$$\sum_{n=1}^6 [(M_{jk} + A_{jk})\xi_k + B_{jk}\xi_k + C_{jk}\xi_k] = F_j e^{i\omega t}, j = 1 \quad (2.9)$$

dengan:

$M_{jk}$  = komponen matriks massa kapal

$A_{jk}, B_{jk}$  = matriks koefisien massa tambah dan redaman

$C_{jk}$  = koefisien-koefisien gaya hidrostatik pengembali

$F_j$  = amplitudo gaya eksitasi dalam besaran kompleks

$F_1, F_2$ , dan  $F_3$  adalah amplitudo gaya-gaya eksitasi yang mengakibatkan *surge, sway*, dan *heave*, sedangkan  $F_4, F_5$ , dan  $F_6$  adalah amplitudo momen eksitasi untuk *roll, pitch*, dan *yaw*.

### 2.2.13 Sistem Tambat

Sistem penambatan pada FSO dapat dikategorikan menjadi dua jenis, yaitu: *weathervaning* dan *non-weathervaning*. *Weathervaning* adalah respon bangunan apung yang bebas berputar terhadap beban lingkungan. *Turret Mooring System* dan *Tower Yoke Mooring System* termasuk dalam sistem tambat *weathervaning*, sedangkan *jetty mooring system* dan *spread mooring* termasuk dalam sistem tambat *non-weathervaning*. Pada *spread mooring system*, skema tandem menjadi lebih baik karena osilasi *stern* lebih tereduksi dengan baik.

#### 1. *Turret Mooring System*

*Turret mooring system*, seperti digambarkan pada Gambar 2.6, menggunkan sembilan sampai 12 tali tambat yang berfungsi sebagai penstabil bangunan apung serta sistem *riser* yang berfungsi sebagai media penyalur natural gas ke *onshore*. de Pee (2005) menyatakan bahwa, kedalaman minimum untuk *turret mooring system* adalah 50 meter. Namun pada perairan yang lebih tenang, kedalaman 35 meter masih mampu beroperasi dengan baik. Gambar dibawah ini termasuk jenis *Internal Turret Mooring System* karena *Turret* berada didalam bangunan laut.



**Gambar 2.6** *Turret Mooring System*  
(sumber : [www.2b1stconsulting.com](http://www.2b1stconsulting.com))

## 2. *Tower Yoke Mooring System*

Liu (2007) mengungkapkan, sistem tambat *Tower yoke*, seperti digambarkan pada Gambar 2.7, terdiri dari *tower* yang dipancangkan ke dasar laut dan rangkaian penghubung atau *yoke* yang berfungsi sebagai penghubung antara *tower* dengan bangunan apung. de Pee (2005) Kedalaman yang cocok untuk sistem ini berkisar dari 18 sampai 40 meter. *Pipeline* penyalur natural gas dari terminal menuju *onshore* diikatkan pada kaki *tower*, sehingga menjaga *pipeline* dari gerakan yang tidak diinginkan. *Tower yoke Mooring System* ini digolongkan pada jenis *Eksternal Turret Mooring System* karena *turret* terdapat pada luar bangunan laut.



**Gambar 2.7** *Tower Yoke Mooring System*

(Sumber : Liu, 2007)

#### 2.2.14 Response Amplitudo Operator (RAO)

*Response Amplitude Operator* (RAO) atau disebut juga dengan *transfer function* merupakan fungsi respon gerakan dinamis struktur yang terjadi akibat gelombang dalam rentang frekuensi tertentu. RAO merupakan alat untuk mentransfer gaya gelombang menjadi respon gerakan dinamis struktur. Menurut Chakrabarti (1987), persamaan RAO dapat dicari dengan rumus sebagai berikut:

$$RAO = \frac{\text{Amplitudo Respon Gerakan}}{\text{Amplitudo Gelombang}} = \frac{R_a}{\zeta_a} \quad (2.10)$$

dimana,

$R_a$  : Amplitudo respon gerakan [m]

$\zeta_a$  : Amplitudo gelombang [m]

Spektrum respons didefinisikan sebagai respons kerapatan energi pada struktur akibat gelombang. Spektrum respons merupakan perkalian antara spektrum gelombang dengan RAO kuadrat, secara matematis dapat ditulis sebagai berikut:

$$S_R = [RAO(\omega)]^2 S(\omega) \quad (2.11)$$



dengan:

$S_R$	= spektrum respons ( $m^2\text{-sec}$ )
$S(\omega)$	= spektrum gelombang ( $m^2\text{-sec}$ )
$RAO(\omega)$	= <i>transfer function</i>
$\omega$	= frekuensi gelombang ( $\text{rad/sec}$ )

### 2.2.15 Analisis Dinamis Berbasis Ranah Frekuensi (*Frequency Domain Analysis*) untuk Gerakan Struktur Kondisi *Free Floating*

Dari hasil yang diperoleh untuk koefisien hidrodinamik dan gaya gelombang yang bekerja pada bangunan apung, maka persamaan gerak untuk *single body* dapat dituliskan sebagai berikut :

$$\sum_{k=1}^6 [(M + A)\ddot{\eta} + B\dot{\eta} + C\eta] = Fe^{-i\omega_e t} \quad (2.12)$$

dengan,

M	= Massa struktur ( <i>generalized mass</i> )
A	= Massa tambah ( <i>added mass</i> )
B	= Koefisien redaman ( <i>damping</i> )
C	= Koefisien pengembali ( <i>restoring</i> )
F	= Amplitudo gelombang dan komponen momen yang didefinisikan sebagai komponen dari $Fe^{-i\omega_e t}$ .

Jika bangunan apung berosilasi akibat gelombang harmonik maka respon struktur yang terbentuk adalah sebagai fungsi harmonik. Analisis berbasis ranah frekuensi dilakukan untuk menentukan respon bangunan struktur pada gelombang reguler yang disajikan dalam bentuk *Respon Amplitude Operator*.

### 2.2.16 Spektrum Gelombang

Menurut Djatmiko (2012), sebuah gelombang reguler memuat energi yang diidentifikasi pada setiap unit atau satuan luas permukaannya

ekuivalen dengan harga kuadrat amplitudonya, seperti yang ditunjukkan pada persamaan di bawah ini:

$$\frac{dE_T}{dA} = \frac{dE_p + dE_k}{dA} = \frac{1}{2} \rho g \zeta_0^2 \quad (2.13)$$

dengan,

$dE_T$  = energi total

$dA$  = luas permukaan

$dE_p$  = energi potensial

$dE_k$  = energi kinetik

$\zeta_0$  = amplitudo gelombang

Penjumlahan energi dari seluruh komponen gelombang reguler per satuan luas permukaan dapat diekspresikan sebagai kepadatan spektrum gelombang atau lebih dikenal dengan istilah spektrum gelombang.

Bersamaan dengan semakin meningkatnya intensitas studi yang dilakukan mengenai respon gerak pada gelombang acak telah banyak dihasilkan spektrum gelombang yang beragam sesuai dengan kondisi lingkungan yang dianalisis. Jenis-jenis spektrum gelombang yang biasa digunakan dalam perhitungan adalah model Pierson-Moskowitz (1964), ISSC (1964), Scott (1965), Bretschneider (1969), JONSWAP (1973), ITTC (1975) dan Wang (1991). Spektrum gelombang yang digunakan dalam analisis ini mengacu pada spektrum gelombang JONSWAP karena karakteristik perairan Indonesia yang tertutup/kepulauan sehingga cocok dengan karakter spektrum JONSWAP.

Spektrum JONSWAP didasarkan pada percobaan yang dilakukan di North Sea. Persamaan spektrum JONSWAP dapat dituliskan dengan memodifikasi persamaan spektrum Pierson-Moskowitz, yaitu :

$$S(\omega) = \alpha g^2 \omega^{-5} \text{EXP} \left[ -1,25 \left( \frac{\omega}{\omega_0} \right)^{-4} \right] \gamma^{\text{EXP} \left[ \frac{-(\omega - \omega_0)^2}{2\tau^2 \omega_0^2} \right]} \quad (2.14)$$

dengan,

$\gamma$  = parameter puncak (*peakedness parameter*)

$\tau$  = parameter bentuk (*shape parameter*) untuk  $\omega \leq \omega_0 = 0,07$  dan  $\omega \geq \omega_0 = 0,09$

$\alpha = 0,0076 (X_0)^{-0,22}$ , untuk  $X_0$  tidak diketahui  $\square = 0,0081$

$\omega_0 = 2\pi \left( \frac{g}{U_\omega} \right) (X_0)^{-0,33}$

$X_0 = \frac{g X}{U_\omega}$

Perhitungan nilai parameter puncak ( $\gamma$ ) dapat ditentukan dengan menggunakan persamaan Toursethaugen (1985) sebagai berikut,

$$\gamma = \text{EXP} \left[ 3,4843 \left( 1 - 0,1975 \left( 0,036 - 0,0056 \frac{T_p}{\sqrt{H_s}} \right) \frac{T_p^4}{H_s^2} \right) \right] \quad (2.15)$$

dengan,

$T_p$  = periode puncak spektra

$H_s$  = tinggi gelombang signifikan

## 2.2.17 Dasar Analisis Dinamis

Tujuan dari rangkaian analisis dinamis penelitian ini pertama adalah untuk mendapatkan frekuensi alami struktur tanpa redaman dan kemudian mencari respon struktur terhadap pembebanan dinamis yang dalam hal ini menggunakan beban gelombang. Menurut *API RP 2T*, terdapat 2 metode analisis simulasi domain dalam analisis dinamis struktur lepas pantai, yaitu:

- a. ***Frequency domain analysis*** adalah simulasi kejadian pada saat tertentu dengan interval frekuensi yang telah ditentukan sebelumnya. *Frequency domain* juga dapat digunakan untuk memperkirakan respon gelombang acak termasuk gerakan dan percepatan *platform*, gaya tendon dan sudut. Keuntungannya



adalah lebih menghemat waktu perhitungan dan juga input atau output lebih sering digunakan oleh perancang. Namun juga terdapat kekurangan dalam metode ini, yaitu semua persamaan *non-linear* harus diubah dalam bentuk *linear*.

**b. Time domain analysis** adalah penyelesaian gerakan dinamis struktur berdasarkan fungsi waktu. Pendekatan yang dilakukan dalam metode ini menggunakan prosedur integrasi waktu dan akan menghasilkan *time history response* berdasarkan fungsi waktu  $x(t)$ .

#### 2.2.18 Analisis Dinamis Berbasis Ranah Waktu (*Time Domain Analysis*)

Jika suatu sistem linear dan beban gelombang yang bekerja hanya terdiri dari *first order* maka beban yang diterima maupun respon yang dihasilkan juga dalam bentuk linear sehingga dapat diselesaikan dengan analisis dinamis berbasis ranah frekuensi (*frequency domain analysis*). Sedangkan jika terkandung di dalamnya faktor-faktor non linear, seperti beban gelombang *second order*, *nonlinear viscous damping*, gaya dan momen akibat angin dan arus maka perhitungan *frequency domain analysis* menjadi kurang relevan. Oleh karena itu untuk mengakomodasi faktor-faktor non linear tersebut maka persamaan gerak dari hukum kedua Newton diselesaikan dalam fungsi waktu atau yang lebih dikenal dengan istilah analisis dinamis berbasis ranah waktu (*time domain analysis*). Persamaan tersebut dideskripsikan sebagai,

$$[m + A(\omega)]\ddot{x} + C(\omega)\dot{x} + D_1\dot{x} + D_2f(\dot{x}) + Kx = q_{WI} + q_{WA}^1 + q_{WA}^2 + q_{CU} + q_{xet} \quad (2.16)$$

dengan,

$$\begin{aligned} q_{WI} &= \text{beban seret angin (wind drag force)} \\ q_{WA}^1 &= \text{beban gelombang first order} \\ q_{WA}^2 &= \text{beban gelombang second order} \\ q_{CU} &= \text{beban arus} \\ q_{xet} &= \text{beban eksternal lainnya} \end{aligned}$$

### 2.2.19 Tegangan Aksial

Tegangan aksial (tegangan normal) adalah intensitas gaya pada suatu titik yang tegak lurus terhadap penampang, yang didefinisikan sebagai:

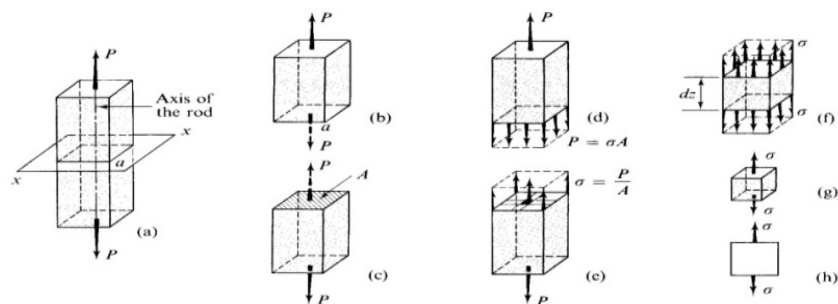
$$f = \frac{F}{A} \quad (2.17)$$

dengan:

F : gaya yang bekerja dalam arah tegak lurus terhadap penampang,

A : luas penampang

Pada batang-batang yang menahan gaya aksial saja, tegangan yang bekerja pada potongan yang tegak lurus terhadap sumbu batang adalah tegangan normal saja, tidak terjadi tegangan geser. Dapat dilihat pada gambar 2.4 dibawah ini



**Gambar 2.8** Ilustrasi tegangan normal akibat gaya aksial, (+) tarik dan (-) tekan  
(Sumber: Popov 1996)

### 2.2.20 Tegangan Von Misses

Kapal harus mampu menahan beban – beban operasional tambahan yang terjadi dengan aman, yaitu tegangan yang terjadi tidak boleh melebihi tegangan yang diijinkan, serta pelat kapal, pelat bilah, agar tidak kehilangan stabilitasnya (tidak mengalami *buckling*).

Untuk menghitung tegangan kita memakai persamaan :

$$\sigma(x, y) = \frac{M_x \cdot y}{I} \quad (2.18)$$

dengan:

$M_x$  = momen bending (ton.m)

$Y$  = jarak normal bidang (m)

$I$  = momen inersia bidang ( $m^2$ )

Jadi harus ditentukan  $y$  yang merupakan jarak “titik berat bagian yang dihitung tegangannya” terhadap sumbu netral (garis mendatar yang melalui titik berat penampang), dan menghitung momen inersia penampang  $I_{(x)}$ . Karena penampang melintang kapal mempunyai banyak bagian, maka menghitung momen inersianya tak dapat dihitung dengan memakai rumus dasar ( $I = \frac{1}{12} b \cdot h^3$ ) dan sebaiknya dilakukan dalam bentuk tabulasi. Seperti telah dijelaskan didepan, akibat beban momen lengkung yang bekerja pada badan kapal, maka bagian penampang kapal yang mengalami tekanan dan posisinya mendatar (horizontal) dimasukkan kedalam perhitungan momen inersia harus sudah diperhitungkan lebar efektifnya, dengan cara seperti pada uraian didepan. Pada element tiga dimensi, bekerja tegangan-tegangan searah sumbu  $x$ ,  $y$ , dan  $z$ . Pada tiap-tiap sumbu dapat diketahui tegangan utama ( $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ ) yang dihitung dari komponen tegangan dengan persamaan sebagai berikut (Ansys 13.0):

$$\begin{bmatrix} \sigma_x - \sigma_0 & \sigma_{xy} & \sigma_{xz} \\ \sigma_{xy} & \sigma_y - \sigma_0 & \sigma_{yz} \\ \sigma_{xz} & \sigma_{yz} & \sigma_z - \sigma_0 \end{bmatrix} = 0 \quad (2.19)$$

dengan:

$\sigma_0$  = tegangan utama yang bekerja pada sumbu

$\sigma_x$  = tegangan arah sumbu  $x$

$\sigma_y$  = tegangan arah sumbu  $y$

$\sigma_z$  = tegangan arah sumbu  $z$

$\sigma_{xy}$  = tegangan arah sumbu  $xy$

$\sigma_{xz}$  = tegangan arah sumbu  $xz$



$\sigma_{yz}$  = tegangan arah sumbu yz

Penggabungan tegangan-tegangan utama pada suatu element merupakan suatu cara untuk mengetahui nilai tegangan maksimum yang terjadi pada node tersebut. Salah satu cara mendapatkan tegangan gabunngan adalah dengan menggunakan formula tegangan *Von Mises*:

$$\sigma_{eq} = \frac{1}{2} \sqrt{(\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_x)^2 + 6(\tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{zx}^2)}$$

(2.20)

dengan:

$\sigma_{eq}$  = tegangan ekuivalen (*von mises stress*)

$\sigma_x$  = tegangan normal sumbu x

$\sigma_y$  = tegangan normal sumbu y

$\sigma_z$  = tegangan normal sumbu z

$\tau_{xy}$  = tegangan geser bidang yz

$\tau_{yz}$  = tegangan geser bidang zx

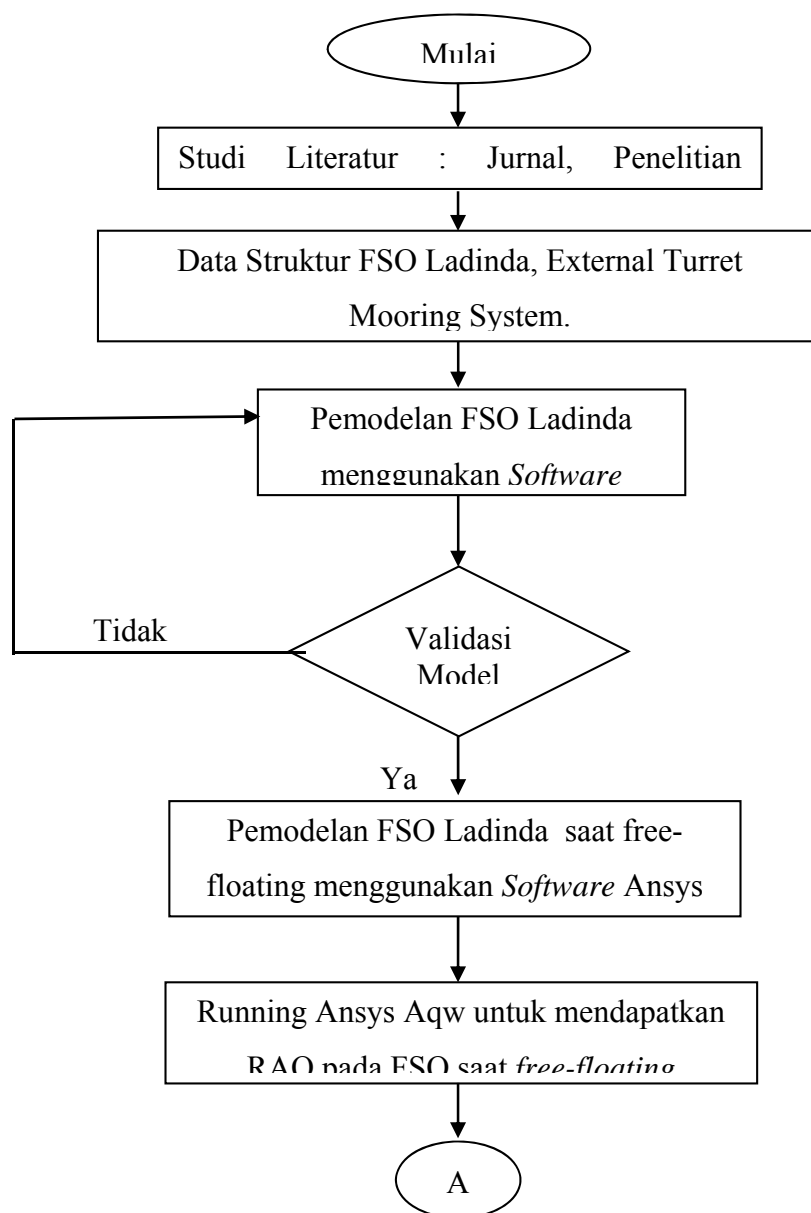
$\tau_{zx}$  = tegangan geser bidang xy

## BAB III

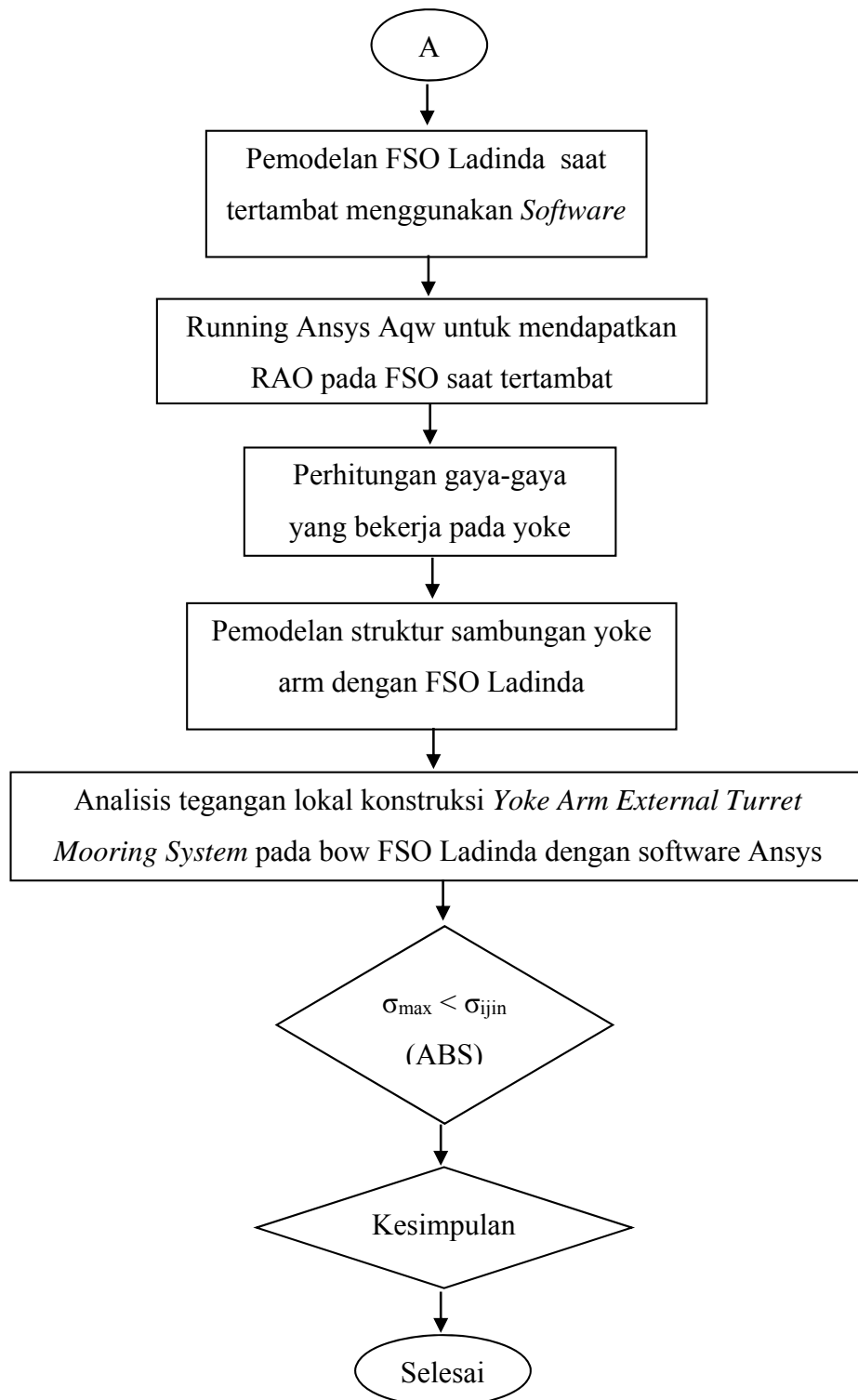
### METODOLOGI PENELITIAN

#### 3.1 Metode Penelitian

Metodologi yang digunakan dalam tugas akhir ini dalam bentuk diagram alir (*flowchart*) pada **Gambar 3.1** sebagai berikut :



**Gambar 3.1** Flowchart penyelesaian Tugas Akhir



**Gambar 3.1** Flowchart penyelesaian Tugas Akhir (lanjutan)

### 3.2 Prosedur Penelitian

Adapun langkah-langkah penelitian dalam diagram alir pada flowchart diatas dapat dijelaskan sebagai berikut :

1. Studi literatur

Studi literatur pada tugas akhir dilakukan untuk mengkaji dasar teori berkaitan dengan analisa tegangan lokal *yoke arm* pada *eksternal turret mooring system* dengan memperhitungkan gaya tarikan yang terjadi pada *yoke* yang akan mendistribusikan gaya tarikan yang diakibatkan oleh beban gelombang, arus dan angin.

2. Pengumpulan Data

- Data FSO *Ladinda*
- Data lingkungan
- Data *Yoke* dan properties *Yoke Arm*
- Data gambar *drawing* Sambungan *Yoke Arm* dengan kapal
- Data konstruksi sambungan *Yoke Arm* dengan FSO *Ladinda*.

3. Pemodelan dengan *software* Maxsurf

Pemodelan ini bertujuan untuk mendapatkan koordinat-koordinat bentuk *body* FSO *Ladinda* serta untuk mendapatkan data hidrostatik model.

4. Validasi model *software* Maxsurf

Setelah model FSO *Ladinda* dibuat pada *software* Maxsurf, dilakukan validasi berdasarkan data hidrostatik. Jika validasi data dianggap salah, maka model akan di desain ulang sampai menyerupai *body* asli dengan batas *error* tidak melebihi 5%

5. Analisa Gerakan dengan *software* ANSYS AQW

*Running* ANSYS AQW dilakukan untuk mendapatkan RAO dari struktur terhadap beban gelombang pada kondisi *free floating* (terapung bebas) dan *Moored* (tertambat). Pada pemodelan tertambat dengan ANSYS AQW menggunakan struktur *Tubular* sebagai *Yoke Arm* yang menghubungkan *Turret Mooring System* dengan FSO *Ladinda*, pada ujung *yoke arm* diberi sebuah *Hinged Joint* dimana pada fungsi dari *Hinged Joint* apabila pada ujung *Yoke Arm* memiliki rotatable pada 1 derajat kebebasan sumbu y



dimana *Yoke Arm* seperti pada kondisi *Pichting*.

6. Menghitung gaya-gaya yg terjadi

Setelah didapatkan RAO pada kondisi *tertambat*, selanjutnya dilakukan pemodelan pada ANSYS AQW kembali untuk mendapatkan gaya-gaya yg terjadi pada *Yoke Arm* dimana terdapat *Tension Force* yang dapat terjadi karena pergerakan dari *Yoke Arm* tersebut, *Tension Force* dihasilkan dari pergerakan *Yoke Arm* yang diakibatkan oleh pengaruh pergerakan FSO Ladinda yang dapat menyebabkan *Yoke Arm* itu bekerja. Modelnya pun meliputi FSO sekaligus *input* data lingkungan dan *Yoke Property*. Data lingkungan berupa beban gelombang 100 tahunan (kondisi badai), Angin, dan Arus di Selat Lalang . Setelah itu dicari *Tension Force* terbesar pada waktu yang sama sehingga didapatkan *Tension Force* pada *Yoke* kanan dan kiri yang menghubungkan. Dari hasil *Tension Yoke Arm* terbesar tersebut data menjadi *input* pembebanan untuk menghitung tegangan lokal pada sambungan *Yoke Arm* dengan FSO Ladinda dengan menggunakan software ANSYS Workbench Mechanical.

7. Pemodelan *Yoke Arm*

Sebelum melakukan pemodelan di Ansys, terlebih dahulu dibuat permodelan 3D pada Autocad 2014 untuk mempermudah. Setelah itu dilanjutkan dengan mengonversi model agar menjadi solid dan juga dilakukan pemilihan material sesuai untuk model sesuai data. Model yang telah dikonvert dari Autocad ke ANSYS Mechanical akan digunakan untuk mendapatkan respon tegangan pada bagian sambungan *Yoke Arm* pada *External Turret Mooring Structure System* dengan FSO Ladinda akibat beban gelombang pada kondisi badai (*extream*) dengan menginput gaya-gaya yang telah dihitung sebelumnya yaitu *Tension Force*.

8. Analisa tegangan lokal pada Konstruksi Sambungan *Yoke Arm*

Tegangan lokal konstruksi *Yoke Arm* pada FSO *Ladinda* dilakukan dengan *running software* ANSYS Workbench Mechanical. Beban yang digunakan dalam analisa lokal ini yaitu beban *Tension Yoke Arm* terbesar.

Kemudian dilakukan analisis terhadap tegangan *von mises* pada konstruksi sambungan *Yoke Arm* yang didapat. Analisis dilakukan dengan mengacu pada standar yang digunakan, yaitu *American Bureau of Shipping* (ABS) untuk mengetahui apakah struktur tersebut sesuai dengan kriteria atau tidak.

9. Selanjutnya, Pengambilan kesimpulan terhadap analisis yang telah dilakukan meliputi pergerakan struktur FSO dan besar tegangan pada sambungan *Yoke Arm* yang menghubungkan FSO Ladinda dengan *External Turret Mooring System* yang mengacu pada *American Bureau of Shipping* (ABS).

### 3.3 Pengumpulan Data

#### 3.3.1 Sejarah FSO Ladinda

Dibawah ini adalah sejarah FSO Ladinda yang dibangun pada tahun 1974 hingga sekarang bereoperasi, pada **gambar 3.2** adalah FSO dengan *mooring wishbone arm system attach to tripod SPOLS* (*Single Point Offshore Loading System*)

Name	: FSO LADINDA
Type	: <i>Moored Oil Storage Barge</i>
Name 1	: Giewont. II
Name 2	: Panditha Natha Sagara – IOC
Name	: Hudbay Riau (HR)
Name 4	: Lasmo Riau
Built In	: Kiel, Germany October 1974
Yard No.	: 80
Conversion	: ROBIN SHIPYARD (PTE) LTD IMODCO DRAWING NO. 1176-4-1-N-01
Class	: Llyod's Register of Shipping
IMO No.	: 7361269 100 AT Oil Storage Barge for Service at Malacca Strait Lalang Field
Port of Registry	: Jakarta

Flag : Indonesia  
Owner : PT. Emha Tara Navindo  
Operator : Kondur Petroleum S.A / EMP



**Gambar 3.2** *mooring wishbone arm system attach to tripod SPOLS (Single Point Offshore Loading System)*  
(Sumber ;PT. Energi Mega Persada, 2014)

### 3.3.2 Data FSO *Ladinda*

Tabel 3.1 adalah data FSO *Ladinda* :

**Tabel 3.1** Ukuran Utama FSO *Ladinda*

Ukuran Kapal	Unit	Kondisi Maksimum Operasi	Kondisi Minimum Operasi
<i>Length, LOA</i>	m	284	
<i>Length, LBP</i>	m	272	
<i>Length, LWL</i>	m	278.80	261.63
<i>Breadth, B</i>	m	43.4	
<i>Depth, D</i>	m	20.6	
<i>Draft, T</i>	m	15.725	2.41
<i>Displacement</i>	Ton	161810	21614
LCG	m	144.11 <i>from AP</i>	123.03 <i>from AP</i>
KG (VCG)	m	10.76	12.57
TCG	m	0	0
LCB	m	143.83 <i>from AP</i>	146.11 <i>from AP</i>
LCF	m	138.176 <i>from AP</i>	145.52 <i>from AP</i>
KB	m	7.72 <i>from BL</i>	1.35 <i>from BL</i>
KM	m	17.69 <i>from BL</i>	53.35 <i>from BL</i>
<i>Midship Section Coefficient</i>		0.995	
<i>Water Plane Coefficient</i>		0.923	
<i>Prismatic Coefficient</i>		0.84	
<i>Block Coefficient</i>		0.83	
<i>Cargo Tank Capacity</i>	Bbls	1.012.000	
<i>Production Level</i>	Bpd	25.000	
<i>General Arrangement</i>	FSO	<i>Ladinda</i>	terlampir

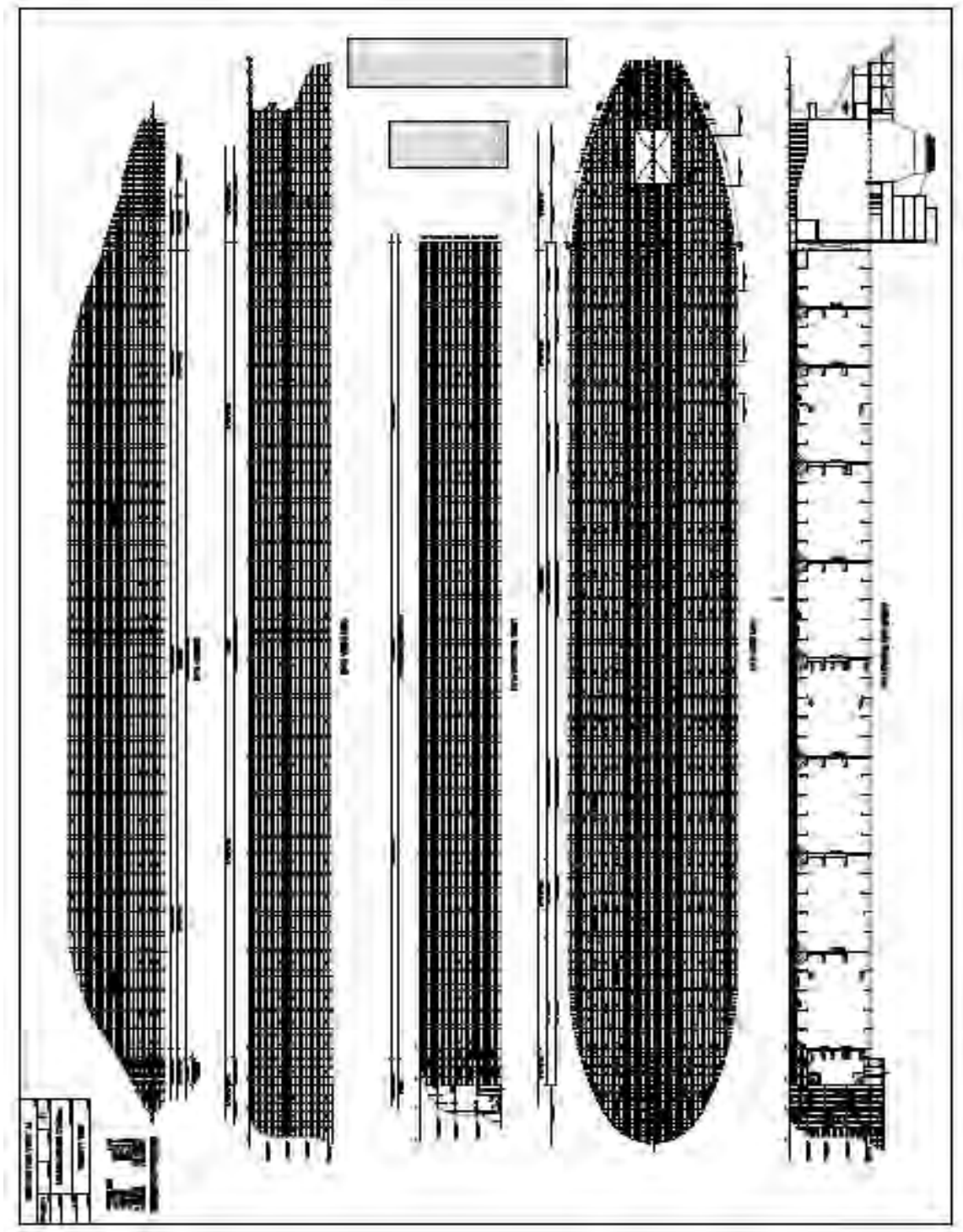
(sumber : PT. Energi Mega Persada, 2014 dalam tugas akhir

M.Athoillah 2014)



### 3.3.3 General Arrangement FSO Ladinda

Gambar 3.2 dibawah ini adalah general arrangement FSO Ladinda :



**Gambar 3.2** *General Arrangement FSO Ladinda*

(sumber : PT. Energi Mega Persada, 2014)

### 3.3.4 Data Lingkungan

Data lingkungan yang digunakan yaitu kondisi lingkungan yang paling berpengaruh di Selat Lalang, dimana lokasi FSO *Ladinda* beroperasi.

Tabel 3.3 adalah data lingkungan Perairan di Selat Lalang :

**Tabel 3.3** Data Lingkungan di Selat Lalang

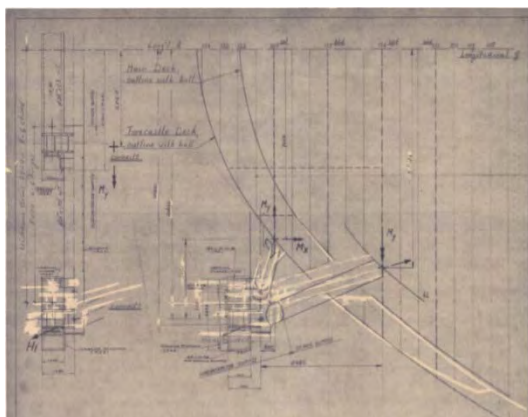
Parameter		Unit	100 – Tahunan
Gelombang	Tinggi ( $H_s$ )	m	1.98
	Periode ( $T_s$ )	s	5
Angin	Kecepatan ( $V_w$ )	knots	22
	Waktu Durasi	hrs	1
Arus	Kecepatan ( $V_c$ )	m/s	2.41

(sumber : PT. Energi Mega Persada, 2014)

Kedalaman dari Selat Lalang, Malaka, Riau dimana FSO *Ladinda* beroperasi adalah 25 meter (sumber : [id.wikipedia.org/wiki/Selat-Malaka](https://id.wikipedia.org/wiki/Selat-Malaka))

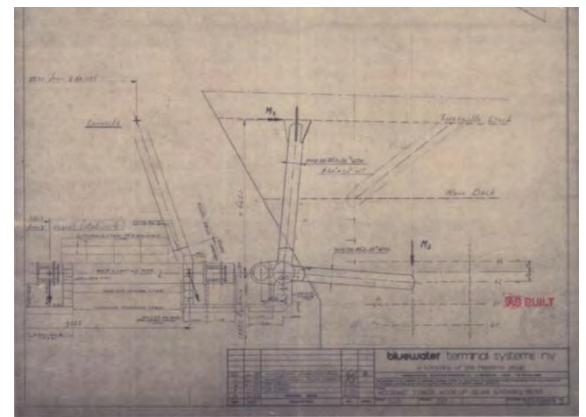
### 3.3.5 Gambar Drawing Sambungan *Yoke Arm* dengan konstruksi depan kapal.

Dibawah ini pada **gambar 3.4** dan **gambar 3.5** adalah gambar sambungan FSO *Ladinda* dengan *Yoke Arm* :



*Gambar3.3*

*Sambungan dilihat dari atas*



*Gambar3.4*

*Sambungan dilihat dari samping*

### 3.3.5 Data Yoke Arm

Data ini adalah data properties design dari yoke arm yang berbentuk silinder berongga. Tabel 3.4 adalah properties dari tubular yoke sebagai :

**Tabel 3.4** Tabel *Properties Yoke Tubular*

<i>Properties Yoke tubular</i>		
OD (Outer Diameter)	30	inch
ID (Inner Diameter)	29	inch
T (Tebal)	1	inch
Panjang Yoke	25.15	m

Sumber : (PT.Energi Mega Persada)

### 3.3.6 Data Material Yoke Arm

Tabel 3.5 adalah data material *yoke arm* dimana material yang digunakan adalah *carbon steel* A36 sebagai berikut :

**Tabel 3.5** Tabel *Properties steel A36*

<i>Properties Steel A36</i>		
Density	7800	kg/m <sup>3</sup>
Young Modulus E	200	GPa
Poisson's Ratio	0.26	
Shear Modulus	75	GPa
Yield Strenght	250	MPa
Ultimate Tension Strenght (UTS)	450	MPa

Sumber : (PT.Energi Mega Persada)

## **BAB IV**

### **ANALISIS DAN PEMBAHASAN**

Pada bab ini akan dibahas hasil dari pemodelan dan perhitungan yang didapatkan dari simulasi dengan menggunakan *software* yang telah disesuaikan dengan metodologi penelitian yang telah terlampir pada bab sebelumnya. Pertama kali dilakukan pemodelan pada *software maxsurf* untuk memperoleh titik-titik koordinat yang dapat digunakan untuk pemodelan selanjutnya. Pemodelan pada *software maxsurf* dilakukan untuk mendapat hidrostatis model yang akan divalidasikan dengan data hidrostatis yang sudah ada. Pembahasan pertama pada bab ini dimulai dengan memverifikasi pemodelan yang telah dilakukan dengan mengoreksi hasil pemodelan dengan data referensi yang ada. Pembahasan kedua ialah menganalisa perilaku gerak struktur saat *free floating* pada gelombang regular yang ditujukan oleh hasil RAO (*Respon Amplitude Operator*).

#### **4.1 Pemodelan Struktur**

##### **Pemodelan dengan *Software Maxsurf***

Pada pemodelan awal *body surface* FSO menggunakan *software Maxsurf* yang bertujuan untuk mendapatkan titik-titik bentuk *body* FSO serta mendapatkan data hidrostatis model. Pemodelan pada *software* ini dilakukan dengan memasukan *principle dimension* yang terdapat pada data referensi FSO pada *software maxsurf*, maka akan didapatkan titik koordinat FSO yang selanjutnya akan dilakukan pemodelan pada *software ANSYS AQW*.

##### **4.1.1 Pemodelan FSO Ladinda**

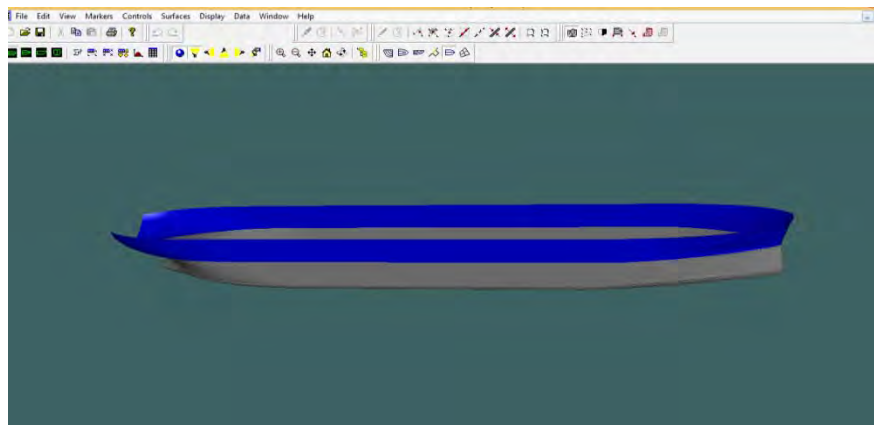
Pemodelan body FSO Ladinda dilakukan dengan dua (2) kondisi, yaitu saat *full load condition* dan *light load condition*. Data yang digunakan sebagai input pemodelan body FSO Ladinda pada *software Maxsurf* Antara lain :



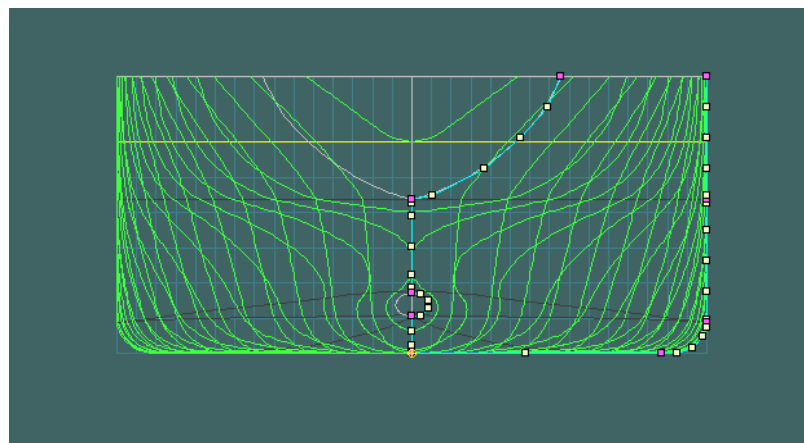
**Tabel 4.1** *Principle Dimension* FSO Ladinda

Designation	Units	Max Operating Draft	Min Operating Draft
Length, LOA	M	284	
Length, LPP	M	272	
Length, Lwl	M	278.8	261.63
Breadth, B	M	43.4	
Depth, D	M	20.6	
Draft, T	M	15.725	2.41

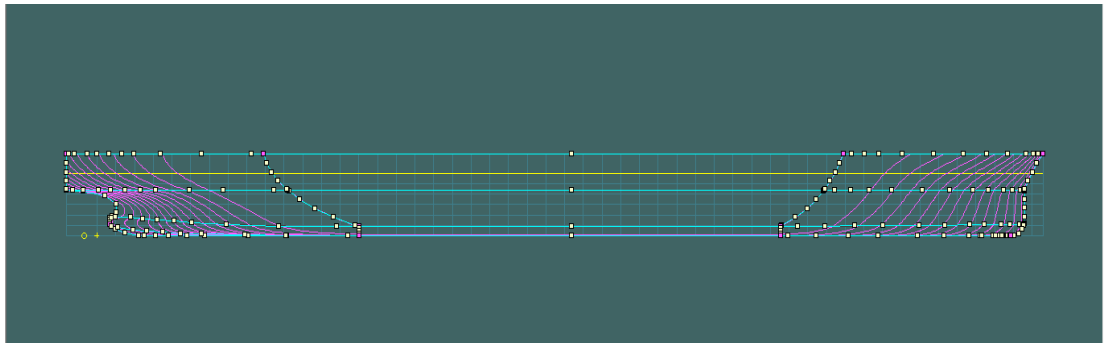
Hasil pemodelan body FSO Ladinda seperti tampak pada gambar 4.1- 4.4 berikut ini:



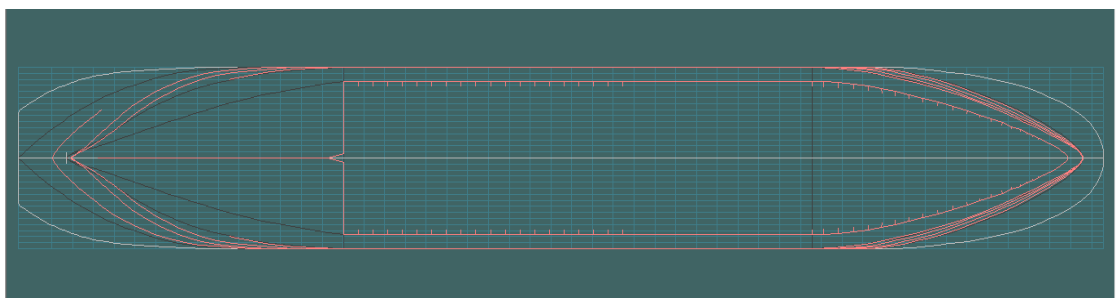
**Gambar 4.1.** Hasil pemodelan FSO Ladinda pada Maxsurf tampak isometric



**Gambar 4.2.** Hasil pemodelan FSO Ladinda pada Maxsurf tampak depan (*body plan*)



**Gambar 4.3.** Hasil pemodelan FSO Ladinda pada Maxsurf tampak samping (*sheer plan*)



**Gambar 4.4.** Hasil pemodelan FSO Ladinda pada Maxsurf tampak atas (*halfbreadth plan*)

## 4.2 Hidrostatik

Untuk mendapatkan model kapal yang sama dengan keadaan sebenarnya, maka perlu dilakukan validasi data-data hidrostatik. Validasi model ini dengan membandingkan data hasil hidrostatik yang dikeluarkan software Maxsurf dengan data hidrostatik dari FSO Ladinda yang sudah ada. Dalam bahasan disini, validasi dilakukan dalam dua kondisi yaitu pada kondisi full load dan light load.

Nilai-nilai hidrostatik yang dibandingkan terdapat pada Tabel 4.2 dan Tabel 4.3 dibawah ini. Perbedaan hasil perhitungan hidrostatik yang diperoleh antara Maxsurf dengan data hidrostatik yang sudah ada pada FSO Ladinda diberikan toleransi atau faktor error sebesar 5%. Dengan demikian hasil perancangan lines plan FSO Ladinda didefinisikan valid untuk digunakan sebagai input dalam menghitung karakteristik kapal.

**Tabel 4.2** Validasi data hidrostatik FSO Ladinda *full load*

Density (Sea Water)	1.025	tonnes/m <sup>3</sup>			
Tolerance	5	%			
	<b>Data</b>	<b>Maxsurf</b>	<b>Koreksi (%)</b>	<b>Unit</b>	<b>Toleransi</b>
Displacement	161810	161488.463	0.00	tonne	Memenuhi
Volume	154630.19	157549.72	-0.02	m <sup>3</sup>	Memenuhi
Draft to Baseline	15.725	15.725	0.00	m	Memenuhi
Immersed depth	15.725	15.725	0.00	m	Memenuhi
Beam wl	43.4	43.4	0.00	m	Memenuhi
Prismatic Coeff	0.84	0.833	0.01		Memenuhi
Block Coeff	0.83	0.828	0.00		Memenuhi
Midship Coeff	1	0.994	0.01		Memenuhi
Waterpl.Area Coeff	0.92	0.895	0.03		Memenuhi
LCB from zero pt	143.83	144.198	0.00	m	Memenuhi
LCF from zero pt	138.18	140.236	-0.01	m	Memenuhi
KB	7.75	8.165	-0.05	m	Memenuhi
KM	17.69	18.219	-0.03	m	Memenuhi

**Tabel 4.3** Validasi data hidrostatik FSO Ladinda *light load*

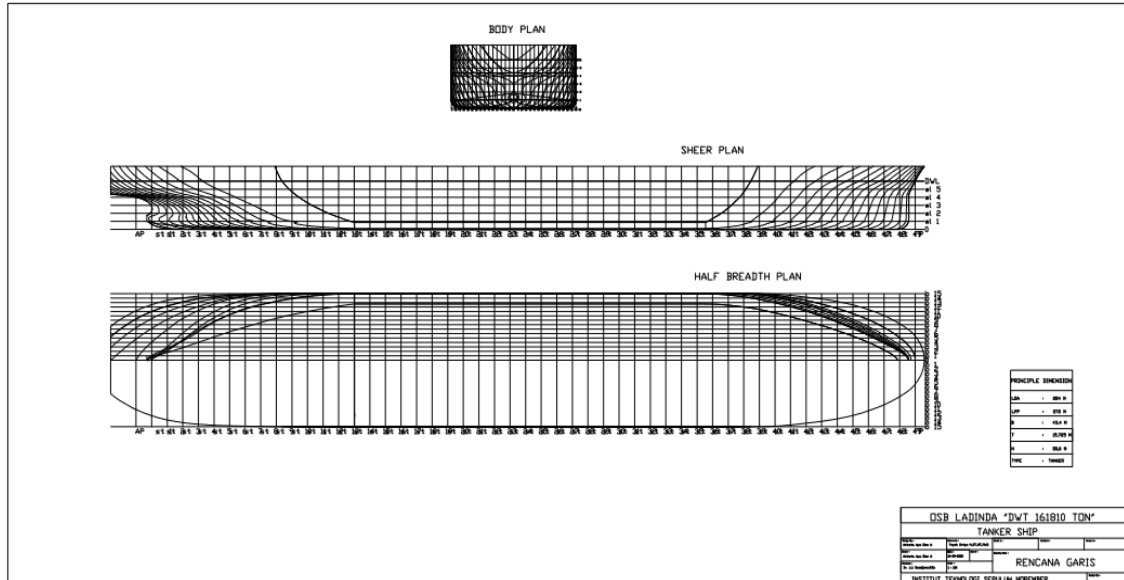
Density (Sea Water)	1.025	tonnes/m <sup>3</sup>			
Tolerance	5	%			
	<b>Data</b>	<b>Maxsurf</b>	<b>Koreksi (%)</b>	<b>Unit</b>	<b>Toleransi</b>
Displacement	21614	21588.691	0.00	tonne	Memenuhi
Volume	21337.18	21062.138	0.01	m <sup>3</sup>	Memenuhi
Draft to Baseline	2.41	2.41	0.00	m	Memenuhi
Immersed depth	2.41	2.41	0.00	m	Memenuhi
Beam wl	43.4	43.116	0.01	m	Memenuhi
Cp	0.84	0.82	0.02		Memenuhi
Cb	0.83	0.815	0.02		Memenuhi
Cm	0.995	0.963	0.03		Memenuhi
LCB from zero pt	146.11	146.044	0.00	m	Memenuhi
LCF from zero pt	145.52	145.711	0.00	m	Memenuhi
KB	1.18	1.243	-0.05	m	Memenuhi
KM	61.6	60.417	0.02	m	Memenuhi

### 4.3 Lines Plan

Hasil pemodelan dari Maxsurf yang telah divalidasi sebelumnya perlu dibuat rencana garis atau *lines plan* dari model-model tersebut. *Lines plan* yang dibuat ialah *lines plan* FSO Ladinda dan *Shuttle Tanker*. Pada gambar 4.5 adalah gambaran *Lines plan* yang dibuat berdasarkan *offset* model hasil *output* Maxsurf yang telah divalidasi.



## Lines Plan FSO Ladinda



**Gambar 4.5** Lines Plan FSO Ladinda

### 4.4 Analisis Gerakan Kapal

Untuk analisis gerakan FSO Ladinda dilakukan dengan bantuan software Ansys AQWA. Dalam menggunakan software Ansys AQWA diperlukan model yang telah dibuat dari software Maxsurf v20. Pada perancangan model FSO Ladinda untuk menganalisis gerakan FSO pada Ansys AQWA membutuhkan data titik berat, displacement dan radius gyration. Dimana besar titik berat dan radius gyration disajikan pada Tabel 4.4 sebagai berikut :

**Tabel 4.4** Data titik berat dan radius gyration pada FSO Ladinda

	FSO FULL LOAD CONDITION	FSO LIGHT LOAD CONDITION
X	8,11 m	-12,97 m
Y	0 m	0 m
Z	10.76 m	12.57 m

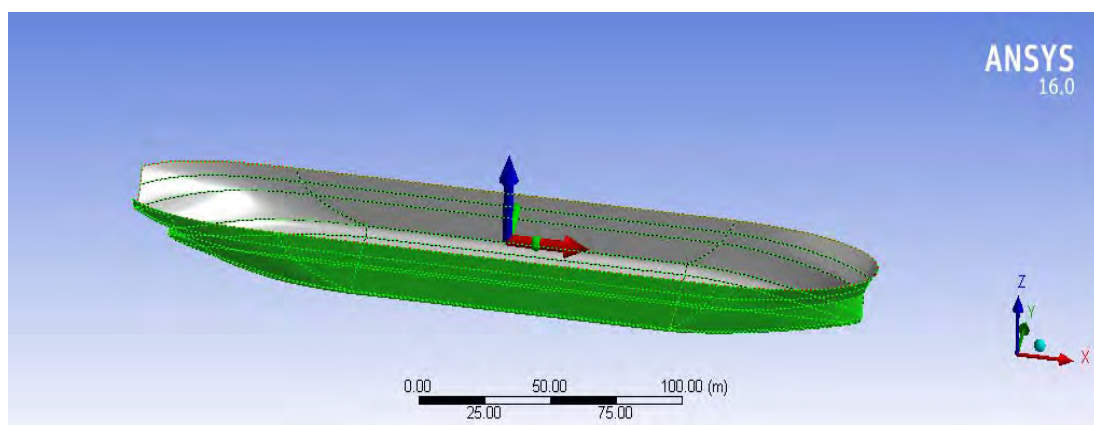
KX	17,36 m	17,36 m
KY	69,70 m	65,40 m
KZ	69,70 m	65,40 m
Displacement	161810 ton	21614 ton

Selain titik berat dan radius gyration dibutuhkan juga data lingkungan untuk menganalisa gerakan dari FSO Ladinda. Data lingkungan diambil dari kondisi lingkungan dimana FSO Ladinda dilayarkan di Selat Malaka pada kondisi extreme 100 tahunan. Pada tabel 4.5 adalah Data lingkungan tersebut meliputi :

Tabel 4.5 Data Lingkungan

<b>Parameter</b>	<b><i>100-years return period</i></b>
Kedalaman	25 m
Tinggi Gelombang Signifikan (Hs)	1.9812 m
Periode Gelombang Signifikan (Ts)	5.0 s

Pada gambar 4.7 bawah ini adalah model FSO Ladinda yang dikeluarkan dari Ansys AQWA berdasarkan data yang telah diinputkan, sebagai berikut :

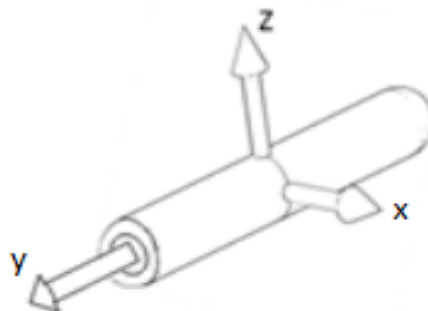


**Gambar 4.6** Model FSO Ladinda pada Ansys

Setelah terdapat model FSO Ladinda dan telah diinputkan data-data yang dibuthkan maka dapat dilakukan analisis selanjutnya.

#### 4.5 Konfigurasi FSO pada saat tertambat

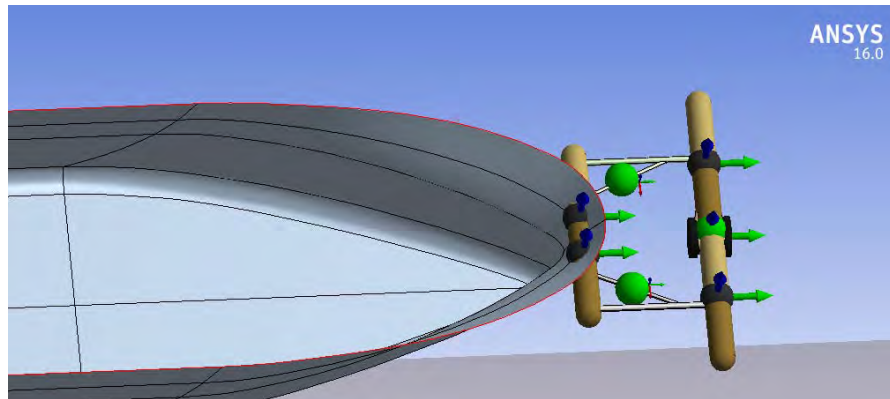
Pada Tugas Akhir ini akan dianalisis konfigurasi tertambat dengan sebuah lengan struktur atau bisa disebutkan dengan yoke arm. Dimana yoke arm ini sebuah struktur tubular sejumlah 2 buah yang dipasangkan pada FSO Ladinda dengan *Tower Mooring System*. Panjang dari *Yoke arm* adalah 25,150 meter. Dimana pada sambungan yoke arm dengan FSO maupun *Tower Mooring System* terdapat sendi engsel, sendi engsel disini pada analisis tertambat menggunakan software Ansys AQW dengan *joint Hinged* dimana joint tersebut memiliki satu derajat kebebasan pada sumbu x. Untuk lebih jelaskan dapat dilihat pada Gambar 4.7 - 4.9 sebagai berikut :



**Gambar 4.7** Joint Hinged



**Gambar 4.8** Konfigurasi FSO tertambat



**Gambar 4.9** Simulasi pemodelan tertambat dengan joint hinged dengan ANSYS Aqw

#### **4.6 *Response Amplitude Operator (RAO)***

Analisis respon gerak terhadap FSO free floating dan tertambat dengan yoke arm dilakukan dengan endapatkan Response Amplitude Operator (RAO) engan menggunakan software Ansys AQWA. Analisis respon ini memperhitungkan RAO pada kondisi terapung bebas dan tertambat. Perhitungan RAO dilakukan pada heading  $0^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $90^\circ$ , dan  $180^\circ$ . Respon gerakan yang dianalisis meliputi gerakan translasi (Surge, Sway, Heave) dengan satuan (m/m) dan gerakan rotasional (Roll, Pitch, Yaw) dengan satuan (deg/m). Pada analisis ini terlebih dahulu dijelaskan skenario muatan dan skenario pembebanan yang akan dikenakan pada FSO. Dibawah ini adalah penjelasan skenario untuk analisis respon gerak FSO :

- Skenario muatan pada FSO Ladinda :
  - a. FSO Ladinda kondisi muatan penuh 100% (full load)
  - b. FSO Ladinda kondisi muatan kosong 0% (light load)
  
- Skenario pembebanan pada FSO Ladinda
  - a. FSO dikenakan beban dari arah  $0^\circ$
  - b. FSO dikenakan beban dari arah  $45^\circ$
  - c. FSO dikenakan beban dari arah  $90^\circ$
  - d. FSO dikenakan beban dari arah  $180^\circ$

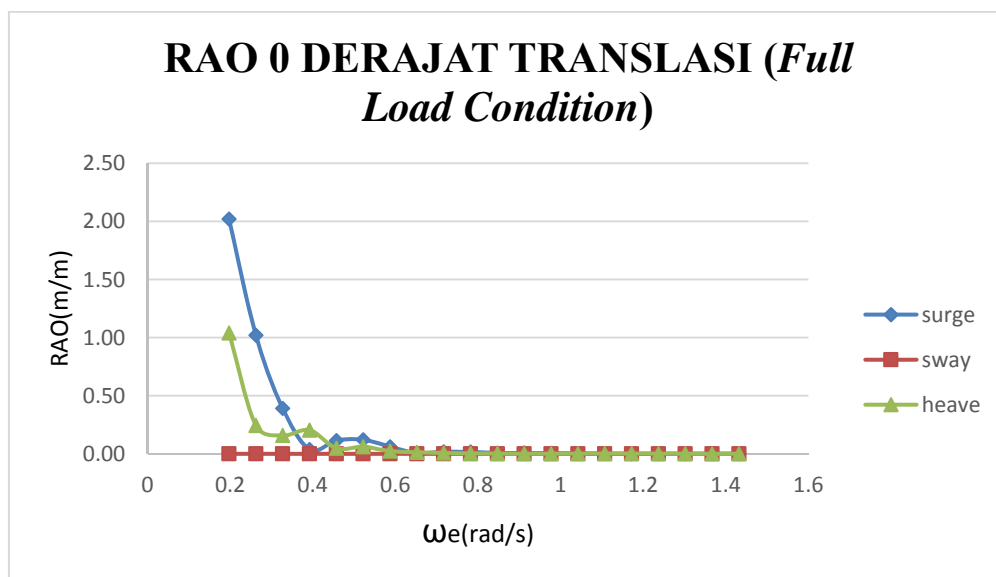


#### 4.6.1 Response Amplitude Operator (RAO ) FSO Kondisi Terapung Bebas (*free floating*)

Analisis gerakan FSO pada kondisi terapung bebas dilakukan pada kondisi full load dan pada kondisi light load. Pada analisis gerakan dilakukan empat arah pembebanan. Arah pembebanan untuk analisis ini adalah following seas ( $0^\circ$ ), quartering seas ( $45^\circ$ ), beam seas ( $90^\circ$ ) dan head seas ( $180^\circ$ ). Pada kondisi *full load* dilakukan pada sarat 15,725 m dan pada kondisi light load dilakukan pada sarat 2,41 m dengan kedalaman laut 25 m. Dibawah ini dilampirkan gerakan FSO dalam muatan full load dan light load, sebagai berikut :

##### RAO FSO Ladinda

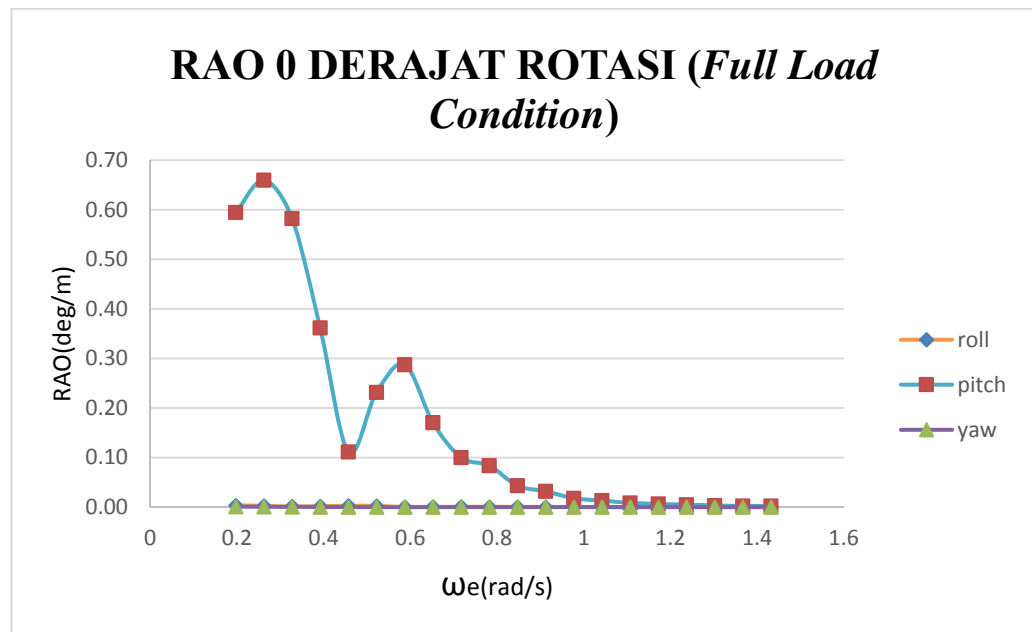
###### 1. *Full load Condition*



**Gambar 4.10** Grafik RAO gerakan translasi pada FSO Ladinda kondisi *full load* saat *free floating* dengan *heading* pembebanan 0 derajat

Pada gambar 4.10 adalah gerakan translasi terdapat gerakan surge, sway, dan heave. Amplitudo gerakan translasi pada heading  $0^\circ$  tertinggi adalah gerakan surge yang tertinggi yaitu sebesar 2,0198 m/m pada frekuensi 0,197 rad/s karena arah datang gelombang yang sejajar sumbu-x yang mana hal tersebut merupakan gerakan translasi surge. Amplitudo pada gerakan surge turun drastis pada frekuensi 0,387 rad/s dan bertambah besarnya frekuensi semakin kecil amplitudo gerakan yg dihasilkan itu

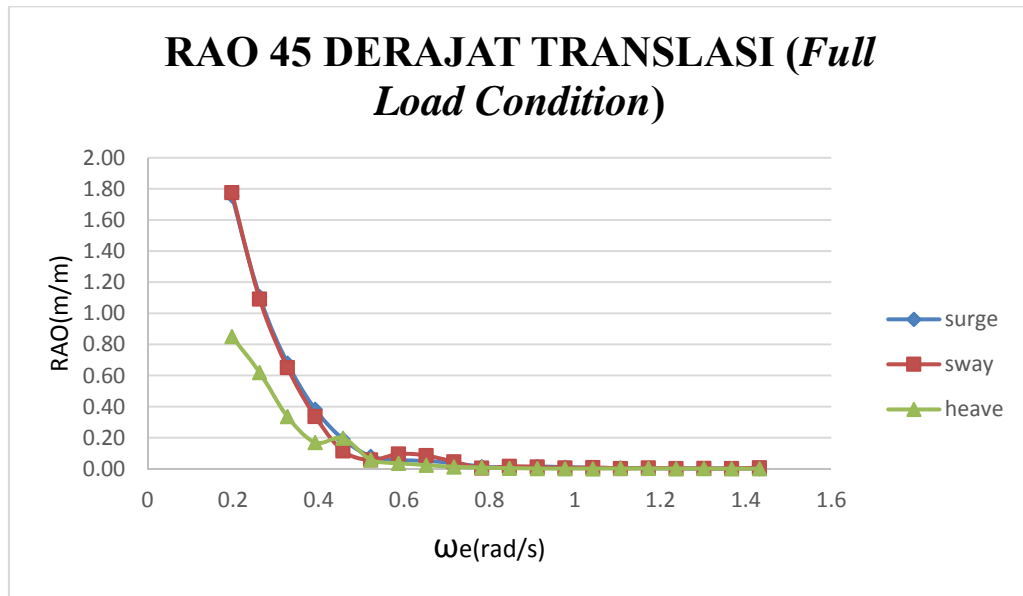
diakibatkan karena pada frekuensi tinggi maka semakin rapat puncak-puncak gelombang berurutan sehingga memberi efek seperti bangunan yang bergerak pada air yang relatif datar. Kondisi FSO bergerak bebas menyebabkan FSO mengalami perilaku gerak yang besar.



**Gambar 4.11** Grafik RAO gerakan rotasi pada FSO Ladinda kondisi *full load* saat *free floating* dengan *heading* pembebanan 0 derajat

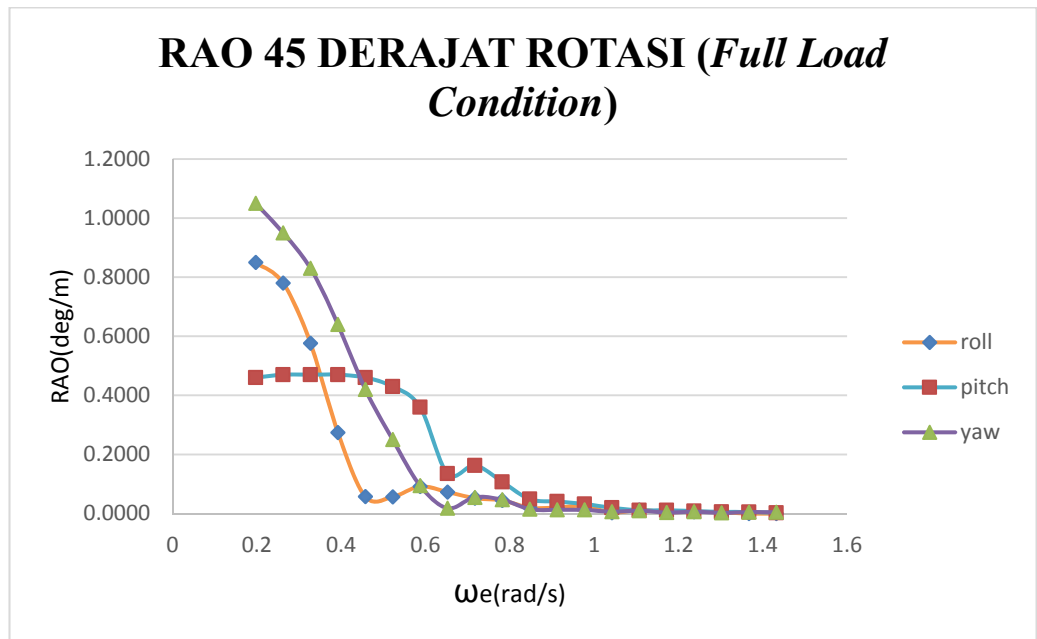
Pada gambar 4.11 adalah gerakan rotasi terdapat gerakan roll, pitch, dan yaw. Amplitudo gerakan rotasi pada heading 0° tertinggi adalah gerakan pitch yang tertinggi yaitu sebesar 0,6598 deg/m pada frekuensi 1,107 rad/s dan amplitudo gelombang turun drastis dengan nilai 0,147 deg/m dengan frekuensi 0,432 rad/s dan naik kembali pada frekuensi 0,616 rad/s dengan besar amplitudo gerakan pitch sebesar 0,297 deg/m dan selanjutnya turun kembali hingga nilai 0,0001 deg/m pada frekuensi 1,412 rad/s. Pada peristiwa ini frekuensi semakin tinggi amplitudo gelombang semakin kecil yang diakibatkan oleh puncak-puncak gelombang yg berurutan sehingga apabila frekuensi semakin tinggi maka akan memberi efek seperti bangunan laut bergerak pada air yang relatif datar. Arah datang gelombang

yang sejajar sumbu-x yang mana hal tersebut merupakan gerakan rotasi pitch.



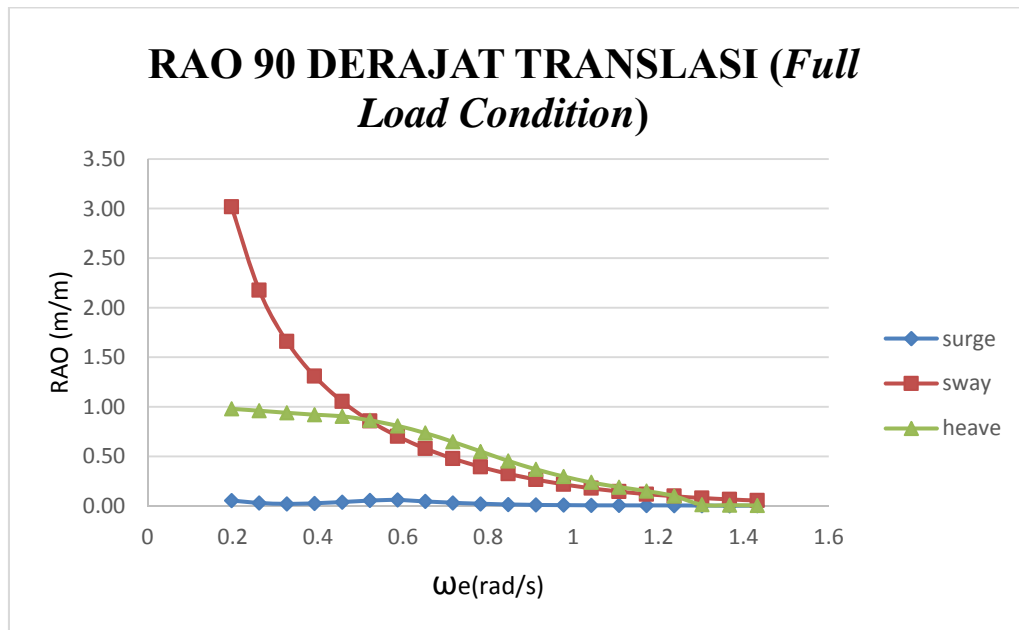
**Gambar 4.12** Grafik RAO gerakan translasi pada FSO Ladinda kondisi *full load* saat *free floating* dengan *heading* pembebanan 45 derajat

Pada gambar 4.12 adalah gerakan translasi terdapat gerakan surge, sway, dan heave. Amplitudo gerakan translasi pada heading 45° tertinggi adalah gerakan sway yang tertinggi yaitu sebesar 1,7760 m/m pada frekuensi 0,197 rad/s dengan besar yang hampir sama pada gerakan surge sebesar 1,7550 m/m ini disebabkan oleh arah gelombang datang sejajar antara sumbu-x dan sumbu-y yang mana sumbu-x dan sumbu-y merupakan pergerakan surge dan sway. Nilai amplitudo gerakan turun drastis hingga nilai 0,0420 m/m pada frekuensi 0,584 rad/s. Pada gambar 4.12 dapat dilihat frekuensi semakin tinggi maka amplitudo gelombang semakin kecil ini diakibatkan karena pada frekuensi tinggi memiliki puncak-puncak gelombang yg berurutan sehingga apabila frekuensi semakin tinggi maka akan memberi efek seperti bangunan laut bergerak pada air yang relatif datar.



**Gambar 4.13** Grafik RAO gerakan rotasi pada FSO Ladinda kondisi *full load* saat *free floating* dengan *heading* pembebanan 45 derajat

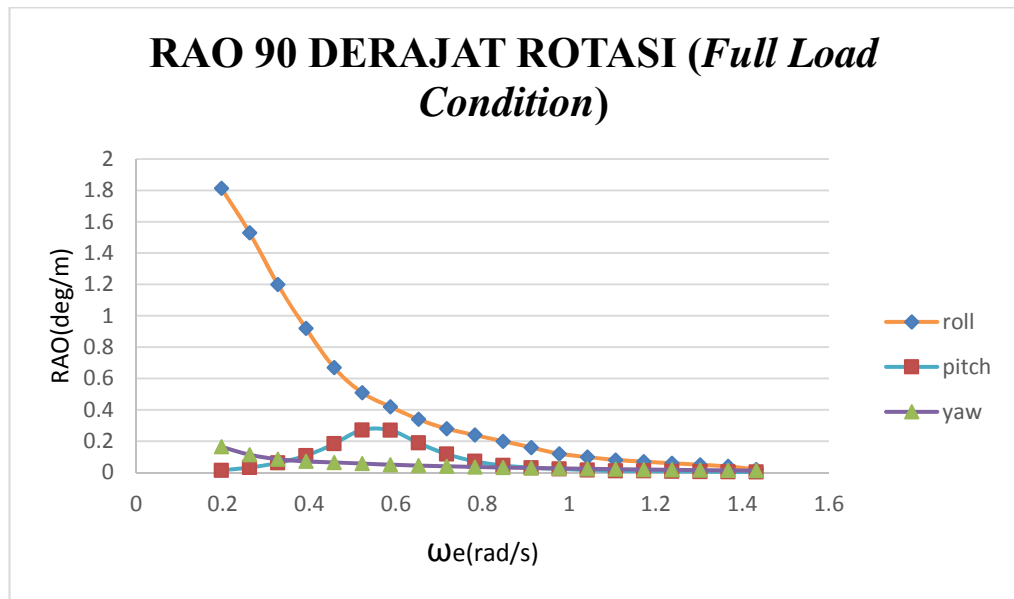
Pada gambar 4.13 adalah gerakan rotasi terdapat gerakan roll, pitch, dan yaw. Amplitudo gerakan translasi pada heading 45° tertinggi adalah gerakan yaw yang tertinggi yaitu sebesar 1,050 deg/m pada frekuensi 0,197 rad/s karena arah datang gelombang yang sejajar antara sumbu-x dan sumbu-y menyebabkan FSO lebih besar bergerak pada gerakan yaw. Pada gerakan yaw nilai amplitudo tertinggi pada frekuensi 0,197 rad/s dan mengalami penurunan nilai sebesar 0,00034 deg/m pada frekuensi 0,617 rad/s ini diakibatkan rapatnya puncak-puncak gelombang sehingga menyebabkan gerakan bangunan laut bergerak seperti pada air yang relatif datar.



**Gambar 4.14** Grafik RAO gerakan translasi pada FSO Ladinda kondisi *full load* saat *free floating* dengan *heading* pembebanan 90 derajat

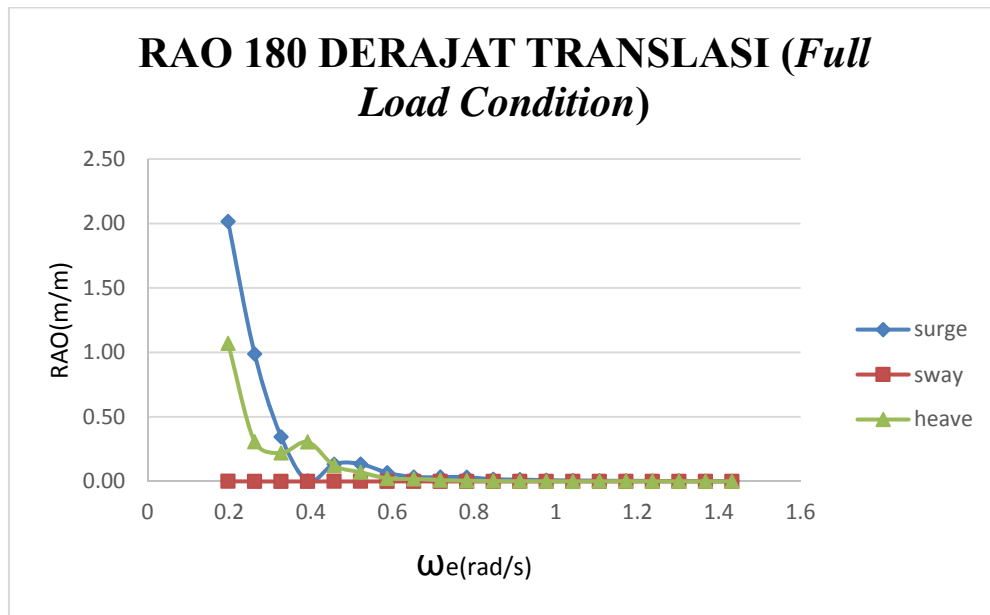
Pada gambar 4.14 adalah gerakan translasi terdapat gerakan surge, sway, dan heave. Amplitudo gerakan translasi pada heading 90° tertinggi adalah gerakan sway yang tertinggi yaitu sebesar 3.0171 m/m pada frekuensi 0,197 rad/s ini disebabkan oleh arah gelombang datang sejajar antara sumbu-y sehingga menyebabkan gerakan FSO sway dimana gerakan sway adalah gerakan yang dihasilkan dari pergerakan translasi terhadap sumbu-y. Pada gerakan sway dapat dilihat semakin tinggi frekuensi gelombang mengakibatkan nilai amplitudo gerakan semakin kecil hingga gerakan pada bangunan laut dengan nilai 0,0002 m/m pada frekuensi 1,428 rad/s. Pada nilai frekuensi semakin tinggi maka nilai amplitudo gelombang semakin kecil yang diakibatkan oleh rapatnya puncak-puncak gelombang yg berurutan sehingga apabila frekuensi semakin tinggi makan akan memberi efek seperti bangunan laut bergerak pada air yang relatif datar.





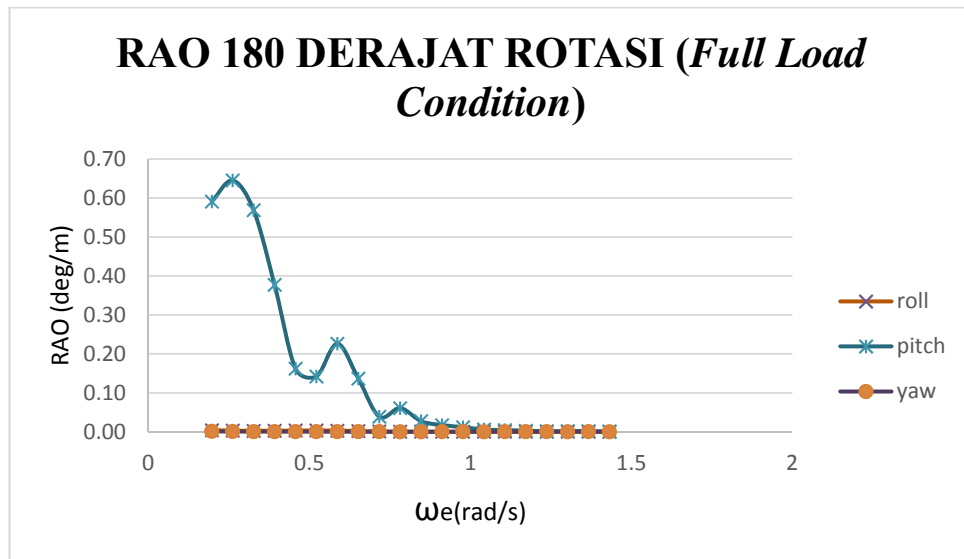
**Gambar 4.15** Grafik RAO gerakan rotasi pada FSO Ladinda kondisi *full load* saat *free floating* dengan *heading* pembebanan 90 derajat

Pada gambar 4.15 adalah gerakan rotasi terdapat gerakan roll, pitch, dan yaw. Amplitudo gerakan translasi pada heading 90° tertinggi adalah gerakan roll yang tertinggi yaitu sebesar 1,8130 deg/m pada frekuensi 0,197 rad/s karena arah datang gelombang yang tegak lurus sumbu-x. Dimana pergerakan akibat tegak lurus sumbu x mengakibatkan gerakan roll. Pada gerakan rolling berangsur-angsur akan mengalami penurunan amplitudo gerakan roll hingga nilai 0,0001 deg/m pada frekuensi 1,421 rad/s. Pada Pada nilai frekuensi semakin tinggi maka nilai amplitudo gelombang semakin kecil yang diakibatkan oleh puncak-puncak gelombang yg berurutan sehingga apabila frekuensi semakin tinggi makan akan memberi efek seperti bangunan laut bergerak pada air yang relatif datar.



**Gambar 4.16** Grafik RAO gerakan translasi pada FSO Ladinda kondisi *light load* saat *free floating* dengan *heading* pembebanan 180 derajat

Pada gambar 4.16 adalah gerakan translasi terdapat gerakan surge, sway, dan heave. Amplitudo gerakan translasi pada heading 180° tertinggi adalah gerakan surge yang tertinggi yaitu sebesar 2,0160 m/m pada frekuensi 0,197 rad/s. Arah pembebanan 180° merupakan arah berlawanan dengan arah pembebanan 0°. Arah pembebanannya sejajar sumbu-x maka mengakibatkan gerakan surge. Pada frekuensi 0,392 rad/s amplitudo gerakan surge mengalami penurunan hingga 0,0005 m/m.. Pada nilai frekuensi semakin tinggi maka nilai amplitudo gelombang semakin kecil yang diakibatkan oleh puncak-puncak gelombang yg berurutan sehingga apabila frekuensi semakin tinggi maka akan memberi efek seperti bangunan laut bergerak pada air yang relatif datar.



**Gambar 4.17** Grafik RAO gerakan rotasi pada FSO Ladinda kondisi *light load* saat *free floating* dengan *heading* pembebanan 0 derajat

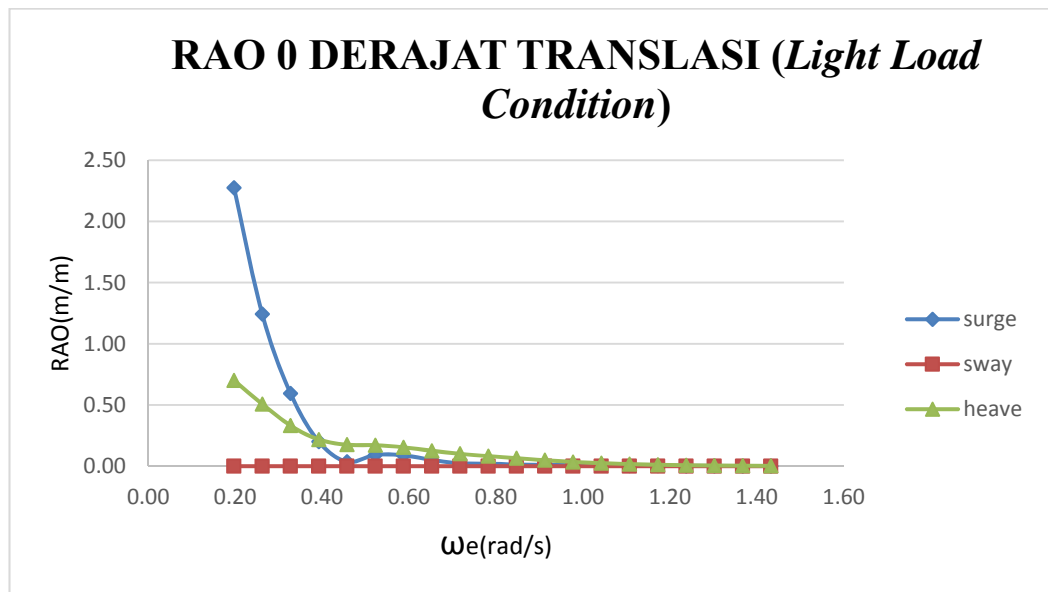
Pada gambar 4.17 adalah gerakan rotasi terdapat gerakan roll, pitch, dan yaw. Amplitudo gerakan translasi pada heading 180° tertinggi adalah gerakan pitch yang tertinggi yaitu sebesar 0,6448 deg/m pada frekuensi 0,262 rad/s karena arah datang sejajar pada sumbu-y. Dimana pergerakan rotasi akibat sejajar sumbu y mengakibatkan gerakan pitch. Pada amplitudo gerakan pitch mengalami penurunan drastis pada frkuensi 0,516 rad/s dengan nilai amplitudo 0,148 deg/m dan naik kembali pada frekuensi 0,627 rad/s dengan nilai 0,221 deg/m selajutnya turun hingga nilai amplitudo gerakan sebesar 0,0001 deg/m pada frekuensi 1,427 rad/s. Peristiwa diatas diakibatkan karena pada nilai frekuensi semakin tinggi maka nilai amplitudo gelombang semakin kecil yang diakibatkan oleh puncak-puncak gelombang yg berurutan sehingga apabila frekuensi semakin tinggi makan akan memberi efek seperti bangunan laut bergerak pada air yang relatif datar.

**Tabel 4.6** Nilai maksimum RAO FSO Ladinda terapung bebas *full load condition*

Moda Gerakan	Unit	RAO Maksimum				Max
		0 deg	45 deg	90 deg	180 deg	
Surge	m/m	2.0198	1.7550	0.0607	2.0160	2.0198
Sway	m/m	0.0003	1.7760	3.0171	0.0003	3.0171
Heave	m/m	1.0400	0.8510	0.9800	1.0700	1.0700
Roll	deg/m	0.0035	0.8500	1.8130	0.0039	1.8130
Pitch	deg/m	0.6198	0.4713	0.2715	0.6448	0.6448
Yaw	deg/m	0.0011	1.0530	0.1650	0.0011	1,0530

Berdasarkan Gambar 4.10 sampai Gambar 4.17 dan Tabel 4.6 di atas dapat dilihat bahwa *surge* tertinggi ialah sebesar 2.0198 (m/m) yaitu pada *heading* 0°, *sway* tertinggi pada *heading* 90° sebesar 3.0171 (m/m), dan *heave* tertinggi sebesar 1.0700 (m/m) pada *heading* 180°. Untuk gerak osilasi rotasional *roll* maksimum pada *heading* 90° sebesar 1.8130 (deg/m), *pitch* maksimum sebesar 0.6198 (deg/m) pada *heading* 0°, dan *yaw* maksimum sebesar 1.0530 (deg/m) pada *heading* 45°.

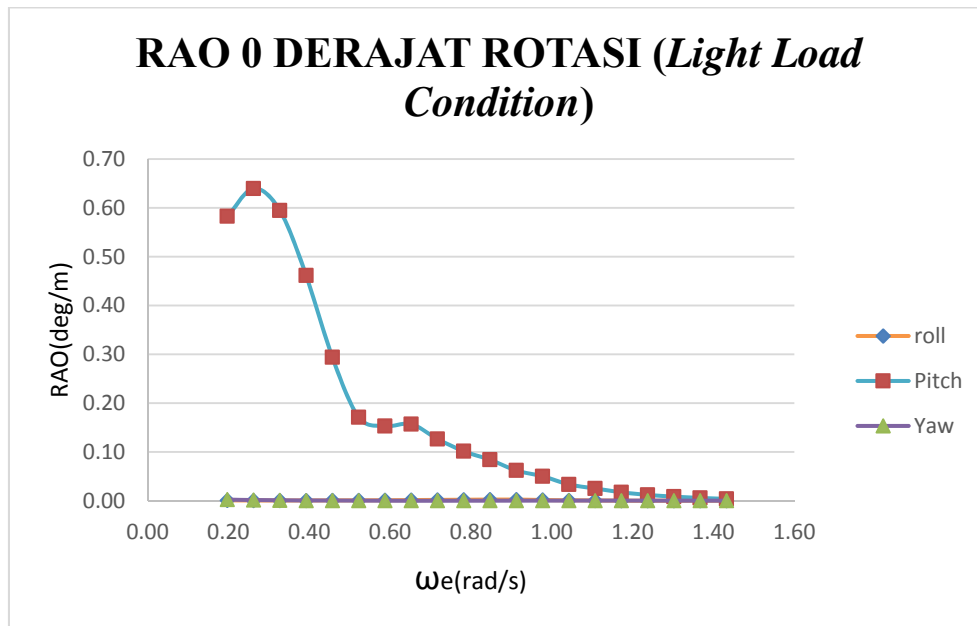
## 2. *Light Load Condition*



**Gambar 4.18** Grafik RAO gerakan translasi pada FSO Ladinda kondisi *light load* saat *free floating* dengan *heading* pembebanan 0 derajat

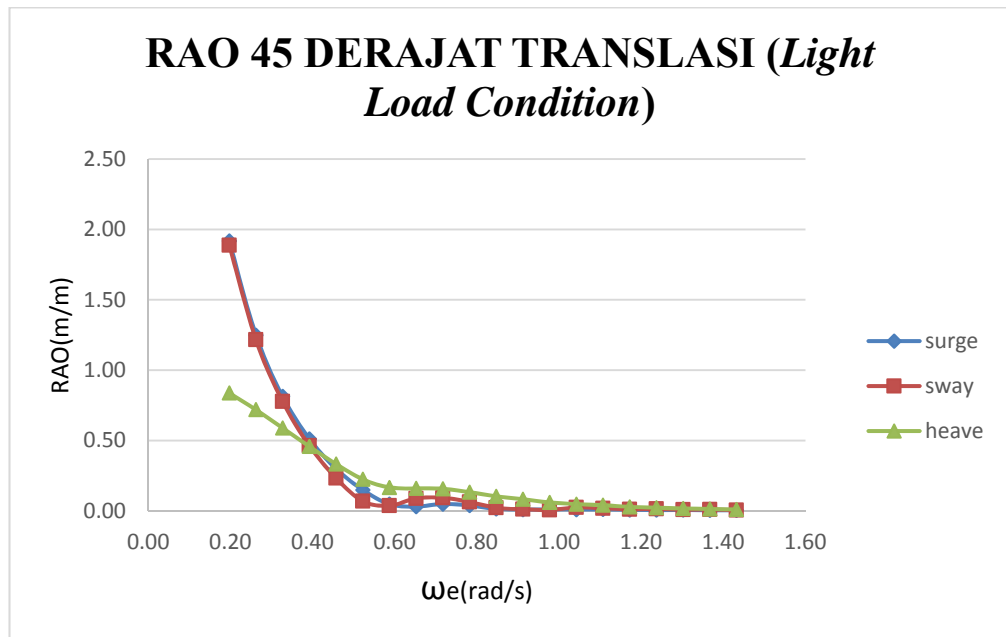
Pada gambar 4.18 adalah gerakan translasi terdapat gerakan surge, sway, dan heave. Amplitudo gerakan translasi pada heading  $0^\circ$  tertinggi adalah gerakan surge yang tertinggi yaitu sebesar 2,2755 m/m pada frekuensi 0,197 rad/s karena arah datang gelombang yang sejajar sumbu-x yang mana hal tersebut merupakan gerakan translasi surge. Kondisi FSO bergerak bebas menyebabkan FSO mengalami perilaku gerak yang besar. Pada frekuensi 0,421 rad/s terjadi penurunan amplitudo gerakan surge dimana nilai gerakan surge sebesar 0,0001 m/m dan semakin tinggi nilai frekuensi maka amplitudo gerakan akan semakin kecil, pada kondisi ini nilai frekuensi semakin tinggi maka nilai amplitudo gelombang semakin kecil yang diakibatkan oleh puncak-puncak gelombang yg berurutan sehingga apabila frekuensi semakin tinggi maka akan memberi efek seperti bangunan laut bergerak pada air yang relatif datar.





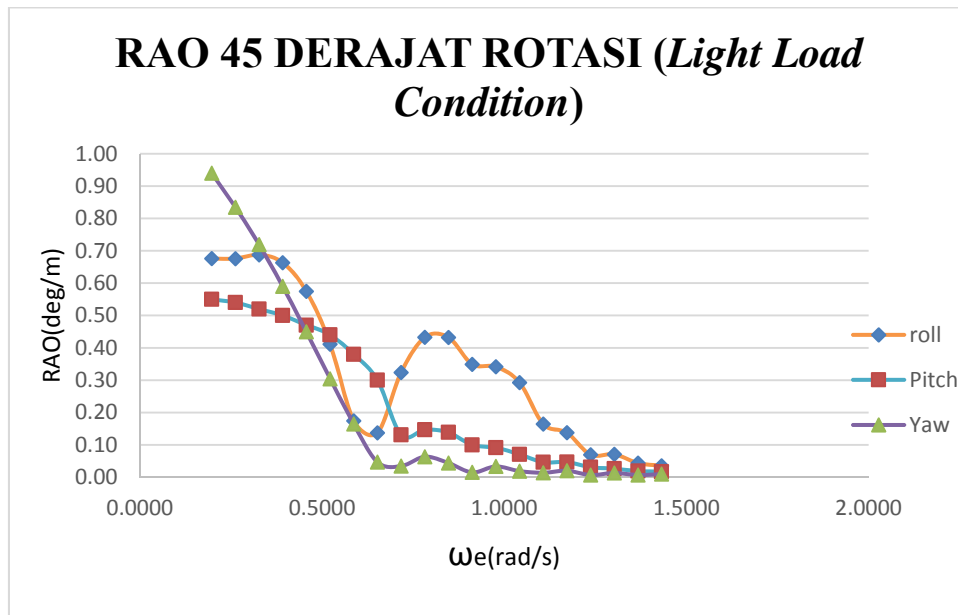
**Gambar 4.19** Grafik RAO gerakan rotasi pada FSO Ladinda kondisi *light load* saat *free floating* dengan *heading* pembebanan 0 derajat

Pada gambar 4.19 adalah gerakan rotasi terdapat gerakan roll, pitch, dan yaw. Amplitudo gerakan translasi pada heading  $0^\circ$  tertinggi adalah gerakan pitch yang tertinggi yaitu sebesar 0,6395 deg/m pada frekuensi 0,262 rad/s karena arah datang gelombang yang sejajar sumbu-y dan amplitudo gelombang turun drastis dengan nilai 0,183 deg/m dengan frekuensi 0,532 rad/s dan naik kembali pada frekuensi 0,636 rad/s dengan besar amplitudo gerakan pitch sebesar 0,186 deg/m dan selanjutnya turun kembali hingga nilai 0,0001 deg/m pada frekuensi 1,412 rad/s. Pada peristiwa ini frekuensi semakin tinggi amplitudo gelombang semakin kecil yang diakibatkan oleh puncak-puncak gelombang yg berurutan sehingga apabila frekuensi semakin tinggi maka akan memberi efek seperti bangunan laut bergerak pada air yang relatif datar. Arah datang gelombang yang sejajar sumbu-x yang mana hal tersebut merupakan gerakan rotasi pitch.



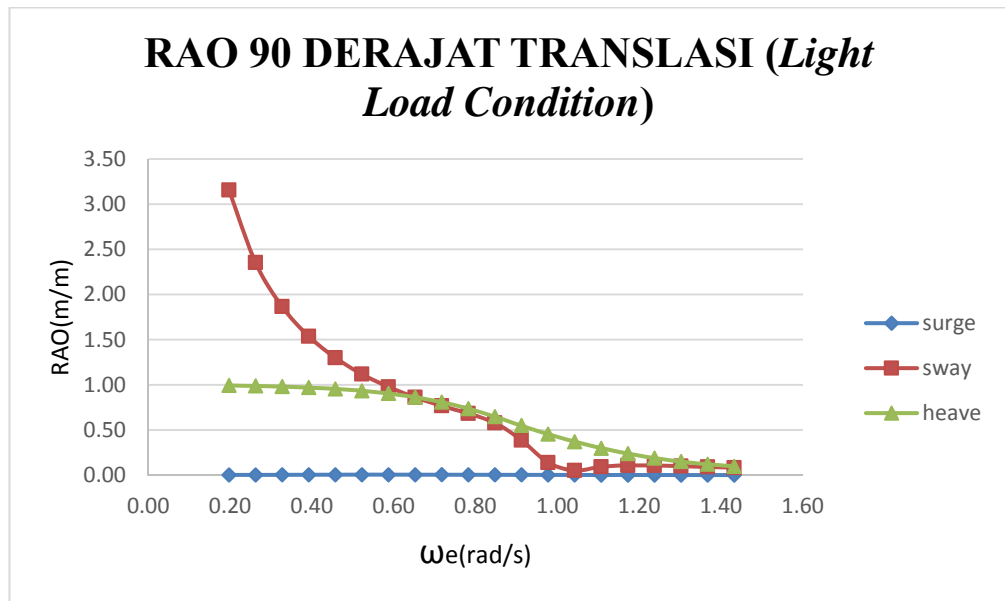
**Gambar 4.20** Grafik RAO gerakan translasi pada FSO Ladinda kondisi *light load* saat *free floating* dengan *heading* pembebanan 45 derajat

Pada gambar 4.20 adalah gerakan translasi terdapat gerakan surge, sway, dan heave. Amplitudo gerakan translasi pada heading 45° tertinggi adalah gerakan sway yang tertinggi yaitu sebesar 1,9185 m/m pada frekuensi 0,197 rad/s dengan besar yang hampir sama pada gerakan surge sebesar 1,8873 m/m ini disebabkan oleh arah gelombang datang sejajar antara sumbu-x dan sumbu-y yang mana sumbu-x dan sumbu-y merupakan pergerakan surge dan sway. Nilai amplitudo gerakan turun drastis hingga nilai 0,0420 m/m pada frekuensi 0,584 rad/s. Pada gambar 4.20 dapat dilihat frekuensi semakin tinggi maka amplitudo gelombang semakin kecil ini diakibatkan karena pada frekuensi tinggi memiliki puncak-puncak gelombang yg berurutan sehingga apabila frekuensi semakin tinggi maka akan memberi efek seperti bangunan laut bergerak pada air yang relatif datar.



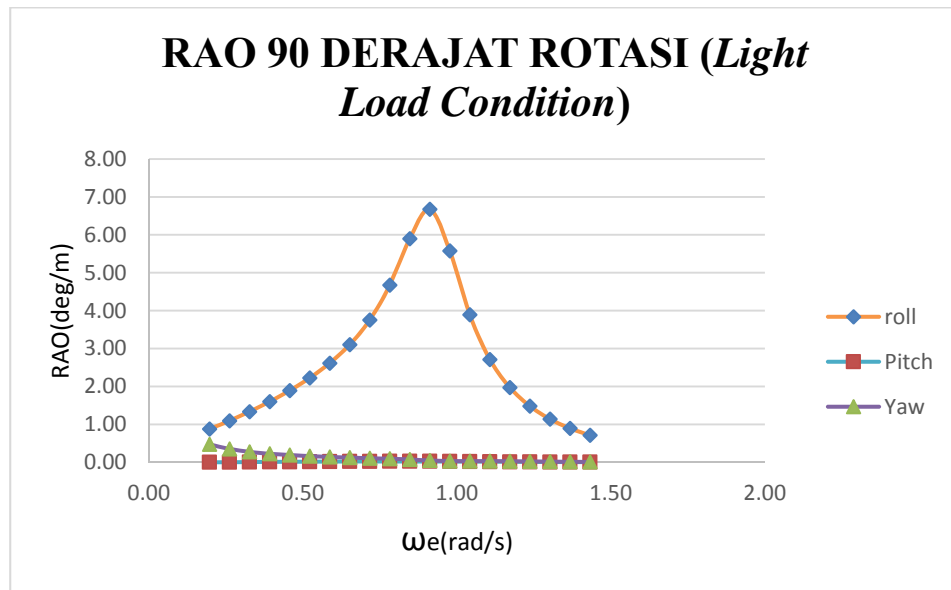
**Gambar 4.21** Grafik RAO gerakan rotasi pada FSO Ladinda kondisi *light load* saat *free floating* dengan *heading* pembebanan 45 derajat

Pada gambar 4.21 adalah gerakan rotasi terdapat gerakan roll, pitch, dan yaw. Amplitudo gerakan translasi pada heading 45° tertinggi adalah gerakan yaw yang tertinggi yaitu sebesar 0,9398 deg/m pada frekuensi 0,197 rad/s karena arah datang gelombang yang sejajar antara sumbu-x dan sumbu-y menyebabkan FSO lebih besar bergerak pada gerakan yaw. Pada gerakan yaw nilai amplitudo tertinggi pada frekuensi 0,197 rad/s dan mengalami penurunan nilai sebesar 0,142 deg/m pada frekuensi 0,637 rad/s dan naik kembali pada frekuensi 0,741 rad/s sebesar 0,452 deg/m dan selanjutnya turun kembali hingga nilai ampiltudo gerakan roll sebesar 0,0021 deg/m pada frekuensi 1,482 rad/s ini diakibatkan rapatnya puncak-puncak gelombang sehingga menyebabkan gerakan bangunan laut bergerak seperti pada air yang relatif datar.



**Gambar 4.22** Grafik RAO gerakan translasi pada FSO Ladinda kondisi *light load* saat *free floating* dengan *heading* pembebanan 90 derajat

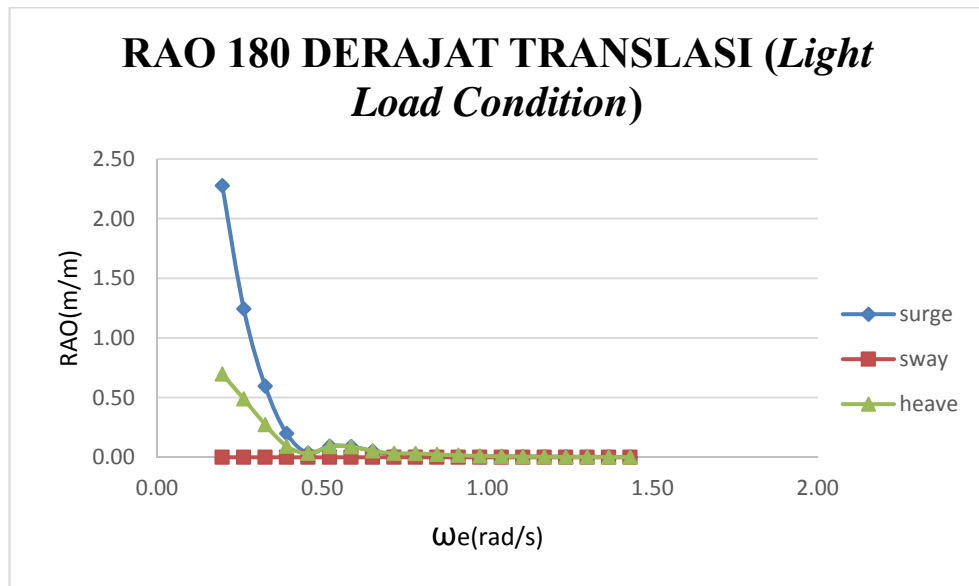
Pada gambar 4.22 adalah gerakan translasi terdapat gerakan surge, sway, dan heave. Amplitudo gerakan translasi pada heading 90° tertinggi adalah gerakan sway yang tertinggi yaitu sebesar 3,1571 m/m pada frekuensi 0,197 rad/s ini disebabkan oleh arah gelombang datang sejajar antara sumbu-y sehingga menyebabkan gerakan FSO sway dimana gerakan sway adalah gerakan yang dihasilkan dari pergerakan translasi terhadap sumbu-y. Pada gerakan sway dapat dilihat semakin tinggi frekuensi gelombang mengakibatkan nilai amplitudo gerakan semakin kecil hingga gerakan pada bangunan laut dengan nilai 0,0003 m/m pada frekuensi 1,428 rad/s. Pada nilai frekuensi semakin tinggi maka nilai amplitudo gelombang semakin kecil yang diakibatkan oleh rapatnya puncak-puncak gelombang yg berurutan sehingga apabila frekuensi semakin tinggi makan akan memberi efek seperti bangunan laut bergerak pada air yang relatif datar.



**Gambar 4.23** Grafik RAO gerakan rotasi pada FSO Ladinda kondisi *light load* saat *free floating* dengan *heading* pembebanan 90 derajat

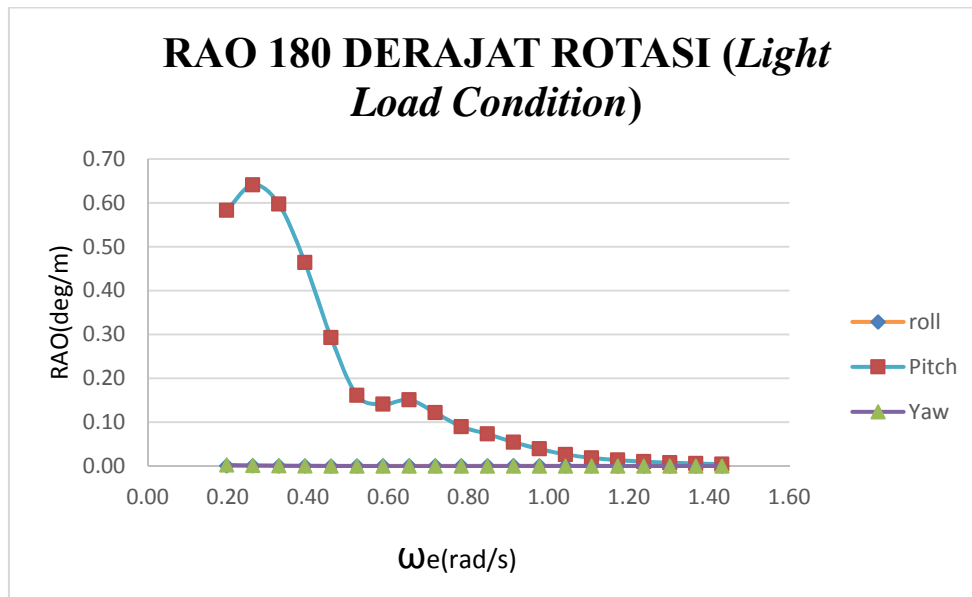
Pada gambar 4.23 adalah gerakan rotasi terdapat gerakan roll, pitch, dan yaw. Amplitudo gerakan translasi pada heading 90° tertinggi adalah gerakan roll yang tertinggi yaitu sebesar 6,6755 deg/m pada frekuensi 0,9120 rad/s karena arah datang gelombang yang tegak lurus sumbu-x. Pada frekuensi kecil nilai amplitudo gerakan roll kecil dengan nilai awal sebesar 0,871 deg/m pada frekuensi 0,241 rad/s dan semakin besar nilai amplitudo hingga nilai terbesar 6,6755 deg/m pada frekuensi 0,9120 rad/s selanjutnya amplitudo gerakan roll mengalami penurunan hingga nilai amplitudo gerakan roll sebesar 0,628 deg/m pada frekuensi 1,452 rad/s. Dimana pergerakan akibat tegak lurus sumbu x mengakibatkan gerakan roll. Pada nilai frekuensi semakin tinggi maka nilai amplitudo gelombang semakin kecil yang diakibatkan oleh puncak-puncak gelombang yg berurutan sehingga apabila frekuensi semakin tinggi maka akan memberi efek seperti bangunan laut bergerak pada air yang relatif datar.





**Gambar 4.24** Grafik RAO gerakan translasi pada FSO Ladinda kondisi *light load* saat *free floating* dengan *heading* pembebanan 180 derajat

Pada gambar 4.24 adalah gerakan translasi terdapat gerakan surge, sway, dan heave. Amplitudo gerakan translasi pada heading 180° tertinggi adalah gerakan surge yang tertinggi yaitu sebesar 2,2772 m/m pada frekuensi 0,197 rad/s. Arah pembebanan 180° merupakan arah berlawanan dengan arah pembebanan 0°. Arah pembebanannya sejajar sumbu-x. Pada frekuensi 0,427 rad/s amplitudo gerakan surge mengalami penurunan hingga 0,0006 m/m. Pada nilai frekuensi semakin tinggi maka nilai amplitudo gelombang semakin kecil yang diakibatkan oleh puncak-puncak gelombang yg berurutan sehingga apabila frekuensi semakin tinggi maka akan memberi efek seperti bangunan laut bergerak pada air yang relatif datar.



**Gambar 4.25** Grafik RAO gerakan rotasi pada FSO Ladinda kondisi *light load* saat *free floating* dengan *heading* pembebanan 180 derajat

Pada gambar 4.25 adalah gerakan rotasi terdapat gerakan roll, pitch, dan yaw. Amplitudo gerakan translasi pada heading 180° tertinggi adalah gerakan pitch yang tertinggi yaitu sebesar 0,6574 deg/m pada frekuensi 0,197 rad/s karena arah datang sejajar pada sumbu-y. Dimana pergerakan rotasi akibat sejajar sumbu y mengakibatkan gerakan pitch. Pada amplitudo gerakan pitch mengalami penurunan drastis pada frekuensi 0,566 rad/s dengan nilai amplitudo 0,152 deg/m dan naik kembali pada frekuensi 0,627 rad/s dengan nilai 0,184 deg/m selajutnya turun hingga nilai amplitudo gerakan sebesar 0,0001 deg/m pada frekuensi 1,427 rad/s. Peristiwa diatas diakibatkan karena pada nilai frekuensi semakin tinggi maka nilai amplitudo gelombang semakin kecil yang diakibatkan oleh puncak-puncak gelombang yg berurutan sehingga apabila frekuensi semakin tinggi maka akan memberi efek seperti bangunan laut bergerak pada air yang relatif datar.

**Tabel 4.7** Nilai maksimum RAO FSO Ladinda terapung bebas *light load condition*

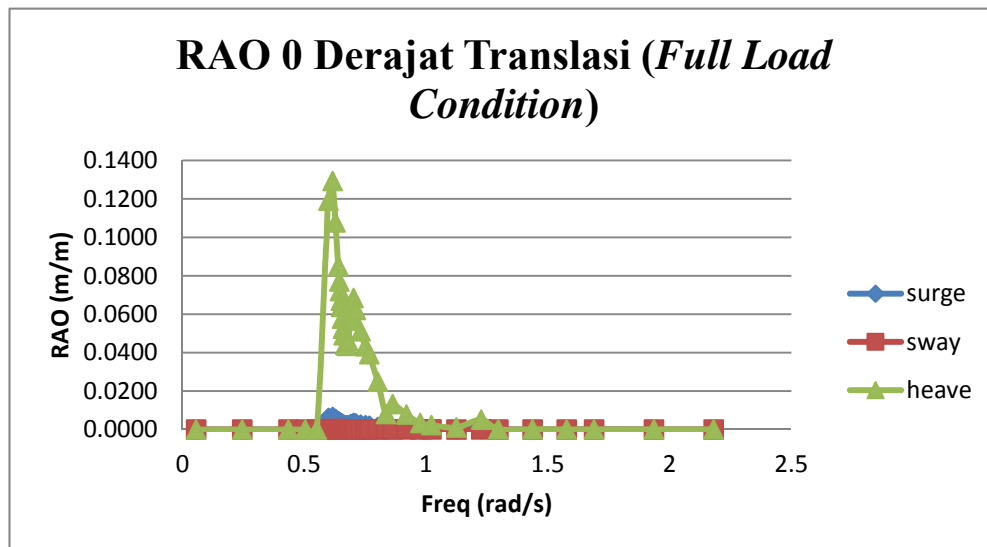
Moda Gerakan	Unit	RAO Maksimum				Max
		0 deg	45 deg	90 deg	180 deg	
Surge	m/m	2.2755	1.8873	0.0051	2.2772	2.2755
Sway	m/m	0.0002	1.9185	3.1571	0.0001	3.1571
Heave	m/m	1.1000	0.8378	1.0000	1.3500	1.3500
Roll	deg/m	0.0024	0.6988	6.6755	0.0009	6.6755
Pitch	deg/m	0.6395	0.6199	0.0268	0.6574	0.6574
Yaw	deg/m	0.0023	0.9398	0.4724	0.0023	0.9398

Berdasarkan Gambar 4.18 sampai Gambar 4.25 dan Tabel 4.7 di atas dapat dilihat bahwa *surge* tertinggi ialah sebesar 2.2755 (m/m) yaitu pada *heading* 0°, *sway* tertinggi pada *heading* 90° sebesar 3.1571 (m/m), dan *heave* tertinggi sebesar 1.35300 (m/m) pada *heading* 180°. Untuk gerak osilasi rotasional *roll* maksimum pada *heading* 90° sebesar 6.6755 (deg/m), *pitch* maksimum sebesar 0.6409 (deg/m) pada *heading* 180°, dan *yaw* maksimum sebesar 0.9398 (deg/m) pada *heading* 45°.

#### **4.6.2 Response Amplitude Operator (RAO ) FSO Kondisi Tertambat (Moored)**

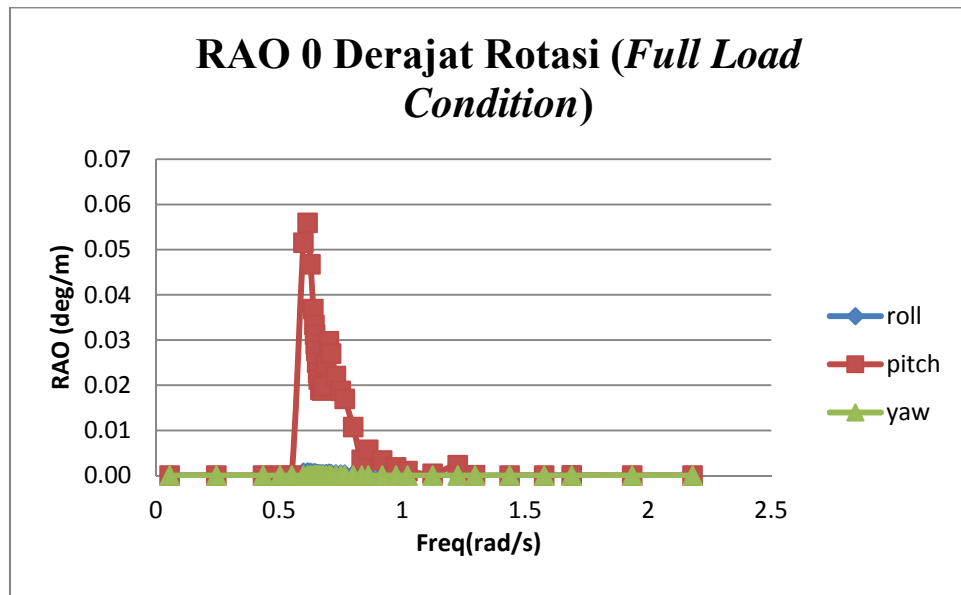
Perhitungan gerakan FSO Ladinda saat tertambat dengan yoke arm yang menghubungkan antara FSO Ladinda dan *Tower Mooring System* digunakan software Ansys AQWA dengan tambatan berupa struktur *rigid* berupa struktur tubular dengan panjang 25.15 m, sehingga FSO hanya dapat bergerak bebas pada pergerakan translasi terhadap sumbu-z dan pada gerakan rotasi terhadap sumbu-y. Pada analisis gerakan FSO saat tertambat dilakukan pada kondisi *full load* dan *light load* dengan pembebanan arah *heading* 0°, 45°, 90°, dan 180°. Berikut hasil dari gerakan FSO Ladinda dalam kondisi *full load* dan *light load* :

### 1. Full load Condition



**Gambar 4.26** Grafik RAO gerakan translasi pada FSO Ladinda kondisi *full load* saat *Mooring* dengan *heading* pembebanan 0 derajat

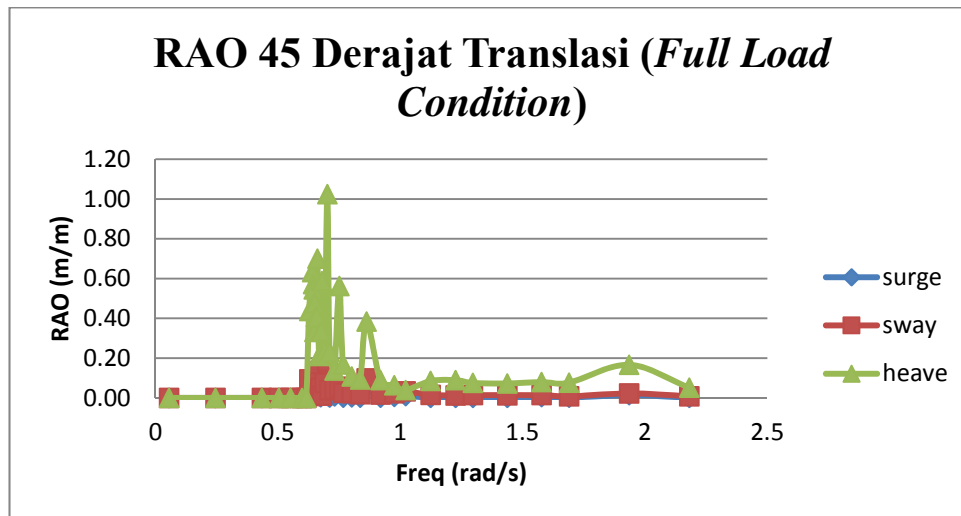
Pada gambar 4.26 adalah Gerakan FSO pada saat tertambat berbeda dengan gerakan FSO saat terapung bebas (*free floating*). Pada *free floating* FSO dapat bergerak bebas dan pada saat tertambat FSO memiliki keterbatasan untuk bergerak. Pembebanan arah  $0^\circ$  seperti pada gambar grafik disebutkan gerakan heave memiliki nilai tertinggi. Walaupun arah pembebanan sejajar sumbu-x, namun terbesar adalah pergerakan gerakan translasi sumbu-z karena pada sistem tertambat pergerakan sumbu-x secara translasi dibatasi. Amplitudo gerakan translasi pada heading  $0^\circ$  tertinggi adalah gerakan heave yang tertinggi yaitu sebesar 0,129 m/m pada frekuensi 0,524 rad/s. Pada frekuensi 0,875 rad/s terjadi penurunan amplitudo gerakan heave dimana nilai gerakan heave sebesar 0,00001 m/m dan semakin tinggi nilai frekuensi maka amplitudo gerakan akan semakin kecil, pada kondisi ini nilai frekuensi semakin tinggi maka nilai amplitudo gelombang semakin kecil yang diakibatkan oleh puncak-puncak gelombang yg berurutan sehingga apabila frekuensi semakin tinggi maka akan memberi efek seperti bangunan laut bergerak pada air yang relatif datar.



**Gambar 4.27** Grafik RAO gerakan rotasi pada FSO Ladinda kondisi *full load* saat *Mooring* dengan *heading* pembebanan 0 derajat

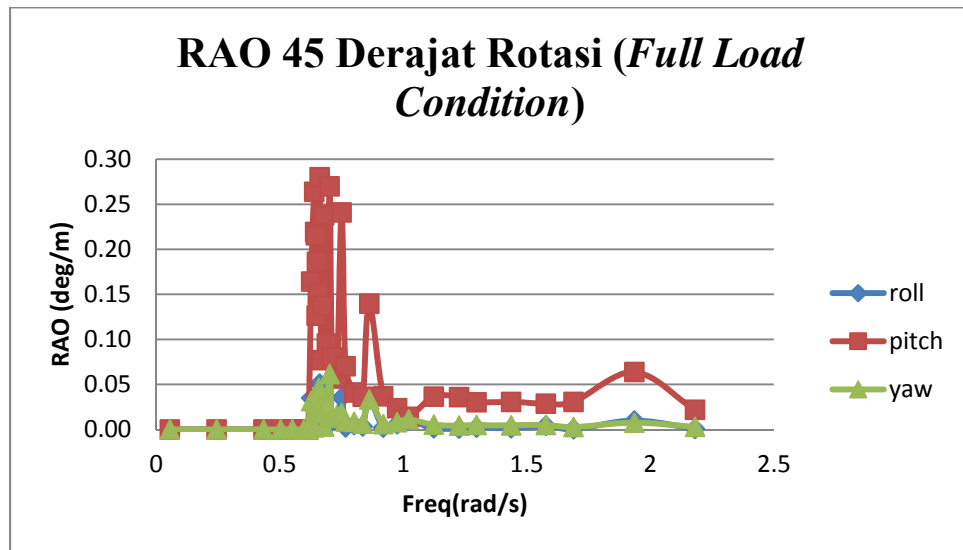
Pada gambar 4.27 adalah Pada pembebanan  $0^\circ$  dengan gerakan rotasi seperti gambar grafik diatas, perilaku gerakan FSO memiliki gerakan terbesar adalah gerakan pitch. Hal ini mempunyai kesamaan saat terapung bebas karena tower yoke membebaskan FSO bergerak secara rotasional terhadap sumbu-y karena terdapat engsel sehingga gerakan rotasi sumbu-y dibebaskan. Amplitudo gerakan translasi pada heading  $0^\circ$  tertinggi adalah gerakan pitch yang tertinggi yaitu sebesar 0,0559 deg/m pada frekuensi 0,625 rad/s. Pada frekuensi 0,875 rad/s terjadi penurunan amplitudo gerakan pitch dimana nilai gerakan surge sebesar 0,00001 m/m dan semakin tinggi nilai frekuensi maka amplitudo gerakan akan semakin kecil, pada kondisi ini nilai frekuensi semakin tinggi maka nilai amplitudo gelombang semakin kecil yang diakibatkan oleh puncak-puncak gelombang yg berurutan sehingga apabila frekuensi semakin tinggi makan akan memberi efek seperti bangunan laut bergerak pada air yang relatif datar.





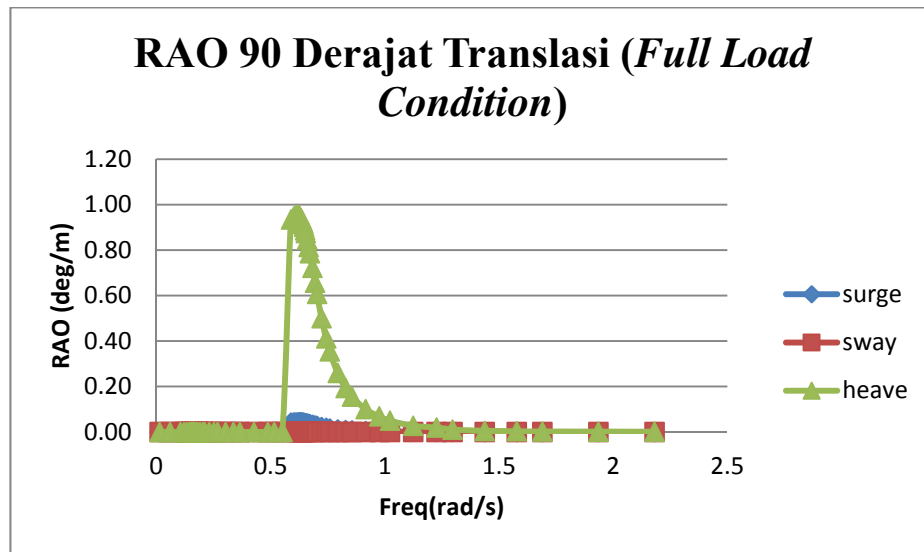
**Gambar 4.28** Grafik RAO gerakan translasi pada FSO Ladinda kondisi *full load* saat *Mooring* dengan *heading* pembebanan 45 derajat

Pada gambar 4.28 adalah Pembebanan heading 45° didominasi oleh gerakan heave sebesar 0,2800 m//m. Pada semua arah pembebanan saat tertambat pada gerakan translasi paling besar berupa heave karena pada sistem tesebut yang paling dibebaskan dari gerakan translasi adalah gerakan translasi sumbu-z dan pada gerakan rotasi dibebaskan pada sumbu-y. Amplitudo gerakan translasi pada heading 45° tertinggi adalah gerakan heave yang tertinggi yaitu sebesar 1,0248 m/m pada frekuensi 0,632 rad/s. Pada heading 45° nilai amplitudo heave naik turun karena heading 45° adalah dimana sudut pembebanan tepat diantara pembebanan arah 0°/180° dan arah pembebanan sudut 90°. Pada frekuensi 1,243 rad/s terjadi penurunan amplitudo gerakan heave dimana nilai gerakan sebesar 0,00001 m/m dan semakin tinggi nilai frekuensi maka amplitudo gerakan akan semakin kecil, pada kondisi ini nilai frekuensi semakin tinggi maka nilai amplitudo gelombang semakin kecil yang diakibatkan oleh puncak-puncak gelombang yg berurutan sehingga apabila frekuensi semakin tinggi makan akan memberi efek seperti bangunan laut bergerak pada air yang relatif datar.



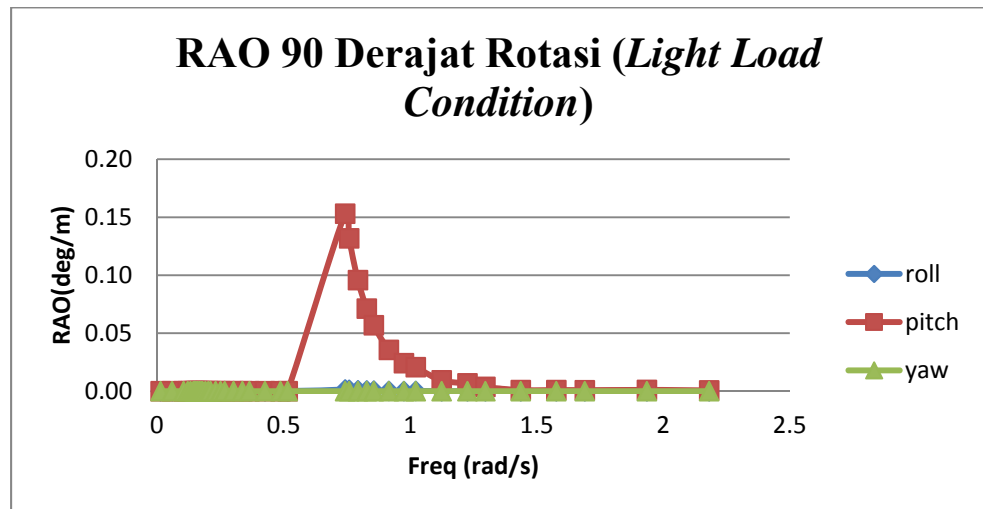
**Gambar 4.29** Grafik RAO gerakan rotasi pada FSO Ladinda kondisi *full load* saat *Mooring* dengan *heading* pembebanan 45 derajat

Pada gambar 4.29 adalah Gerakan rotasi FSO saat pembebanan  $45^\circ$  tertinggi adalah gerakan pitch atau gerakan pada sumbu-y. Pada sistem ini juga membebaskan pergerakan rotasi terhadap sumbu-x atau gerakan roll, tapi tidak sebasas pergerakan rotasi terhadap sumbu-y atau gerakan pitch. Amplitudo gerakan rotasi pada heading  $45^\circ$  tertinggi adalah gerakan pitch yang tertinggi yaitu sebesar 0,280 deg/m pada frekuensi 0,674 rad/s. Pada frekuensi 1,141 rad/s terjadi penurunan amplitudo gerakan pitch dimana nilai gerakan pitch sebesar 0,00001 deg/m dan semakin tinggi nilai frekuensi maka amplitudo gerakan akan semakin kecil, pada kondis ini nilai frekuensi semakin tinggi maka nilai amplitudo gelombang semakin kecil yang diakibatkan oleh puncak-puncak gelombang yg berurutan sehingga apabila frekuensi semakin tinggi makan akan memberi efek seperti bangunan laut bergerak pada air yang relatif datar.



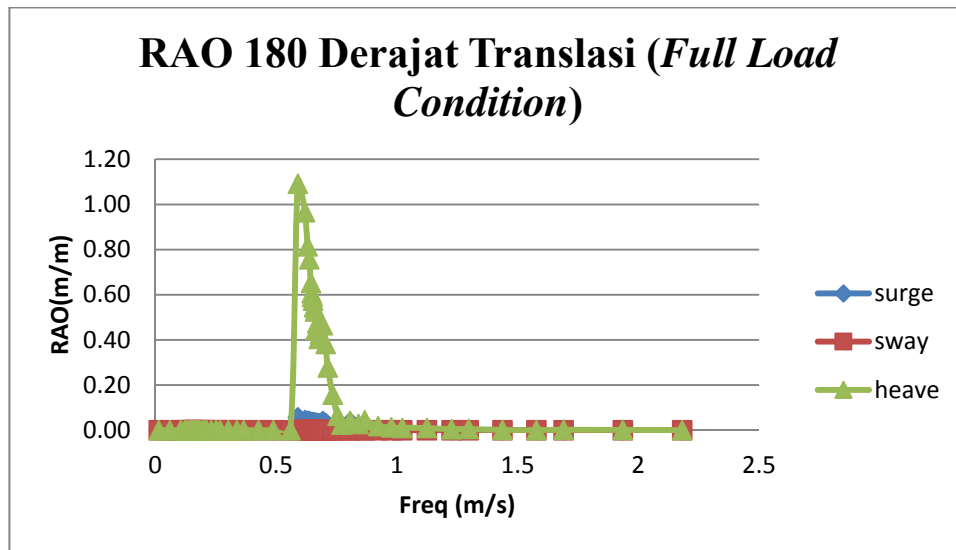
**Gambar 4.30** Grafik RAO gerakan translasi pada FSO Ladinda kondisi *full load* saat *Mooring* dengan *heading* pembebanan 90 derajat

Pada gambar 4.30 adalah Gambar grafik diatas dapat dilihat gerakan yang dominan adalah gerakan heave atau pada sumbu-z. Pembebanan arah  $90^\circ$  secara translasi terbesar adalah gerakan heave yaitu sebesar 0,9547 m/m pada frekuensi 0,620 rad/s. Amplitudo gerakan translasi pada heading  $90^\circ$  tertinggi adalah gerakan heave yang tertinggi yaitu sebesar 0,9547 m/m pada frekuensi 0,621 rad/s. Pada frekuensi 0,985 rad/s terjadi penurunan amplitudo gerakan surge dimana nilai gerakan surge sebesar 0,00002 m/m dan semakin tinggi nilai frekuensi maka amplitudo gerakan akan semakin kecil, pada kondis ini nilai frekuensi semakin tinggi maka nilai amplitudo gelombang semakin kecil yang diakibatkan oleh puncak-puncak gelombang yg berurutan sehingga apabila frekuensi semakin tinggi makan akan memberi efek seperti bangunan laut bergerak pada air yang relatif datar.



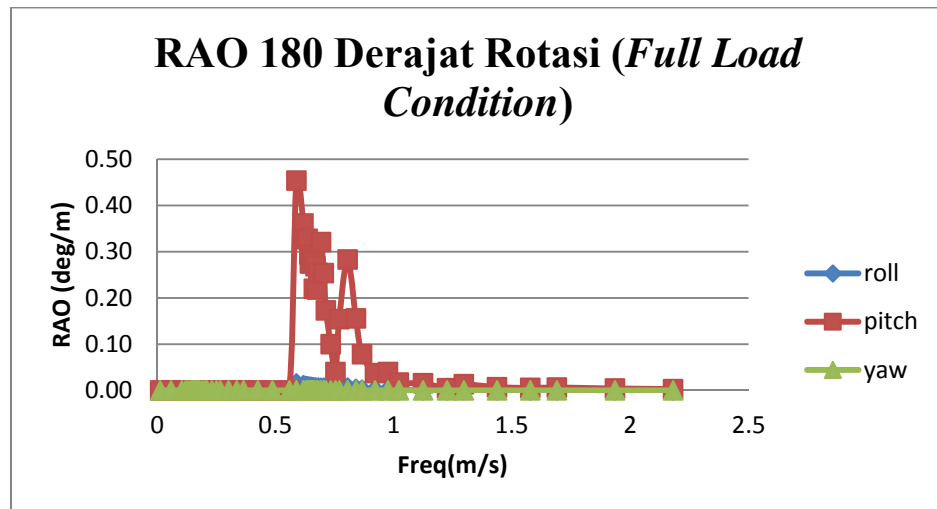
**Gambar 4.31** Grafik RAO gerakan rotasi pada FSO Ladinda kondisi *full load* saat *Mooring* dengan *heading* pembebanan 90 derajat

Pada gambar 4.31 adalah Gambar grafik diatas dapat dilihat gerakan paling besar adalah gerakan pitch atau gerakan rotasi pada sumbu-y dengan nilai 0,1531 deg/m pada frekuensi 0,821 rad/s. Setelah nilai tertinggi pitch nilai terbesar selanjutnya adalah gerakan roll dengan nilai 0,0035 deg/m dan pada gerakan pitch dapat dilihat semakin tinggi frekuensi gelombang mengakibatkan nilai amplitudo gerakan semakin kecil hingga gerakan pada bangunan laut dengan nilai 0,00003 m/m pada frekuensi 2,438 rad/s. Pada nilai frekuensi semakin tinggi maka nilai amplitudo gelombang semakin kecil yang diakibatkan oleh rapatnya puncak-puncak gelombang yg berurutan sehingga apabila frekuensi semakin tinggi maka akan memberi efek seperti bangunan laut bergerak pada air yang relatif datar.



**Gambar 4.32** Grafik RAO gerakan translasi pada FSO Ladinda kondisi *full load* saat *Mooring* dengan *heading* pembebanan 180 derajat

Pada gambar 4.32 adalah Gambar grafik diatas dapat dilihat gerakan translasi yang berupa gerakan surge, sway dan heave. Nilai amplitudo gerakan terbesar adalah gerakan heave atau gerakan translasi sumbu-z yaitu dengan nilai sebesar 1,0915 m/m selanjutnya gerakan heave yaitu sebesar 0,0577 m/m dan amplitudo gerakan heave turun hingga drastis sebesar 0,00002 m/m pada frekuensi 0,735 rad/s dan selanjutnyapada frekuensi tinggi amplitudo gerakan semakin landai yang diakibatkan oleh puncak-puncak gelombang yang akhirnya seperti bangunan laut berada diatas air yang relatif datar.



**Gambar 4.33** Grafik RAO gerakan rotasi pada FSO Ladinda kondisi *full load* saat *Mooring* dengan *heading* pembebanan 180 derajat

Pada gambar 4.33 adalah Gambar grafik diatas merupakan gerakan FSO arah pembebanan  $180^\circ$  dengan gerakan rotasi gerakan terbesar adalah gerakan pitch sebesar 0,4540 deg/m , gerakan besar kedua adalah gerakan roll sebesar 0,0153 deg/m dan terakhir adalah gerakan yaw sebesar 0,0004 deg/m. Pada gerakan terbesar pitch dapat dilihat semakin tinggi frekuensi gelombang mengakibatkan nilai amplitudo gerakan turun pada bangunan laut dengan nilai 0,005 m/m pada frekuensi 0,732 rad/s dan naik kembali pada nilai amplitudo gerakan sebesar 0,311 deg/m pada frekuensi 0,815 rad/s. Pada nilai frekuensi semakin tinggi maka nilai amplitudo gelombang semakin kecil yang diakibatkan oleh rapatnya puncak-puncak gelombang yg berurutan sehingga apabila frekuensi semakin tinggi makan akan memberi efek seperti bangunan laut bergerak pada air yang relatif datar.

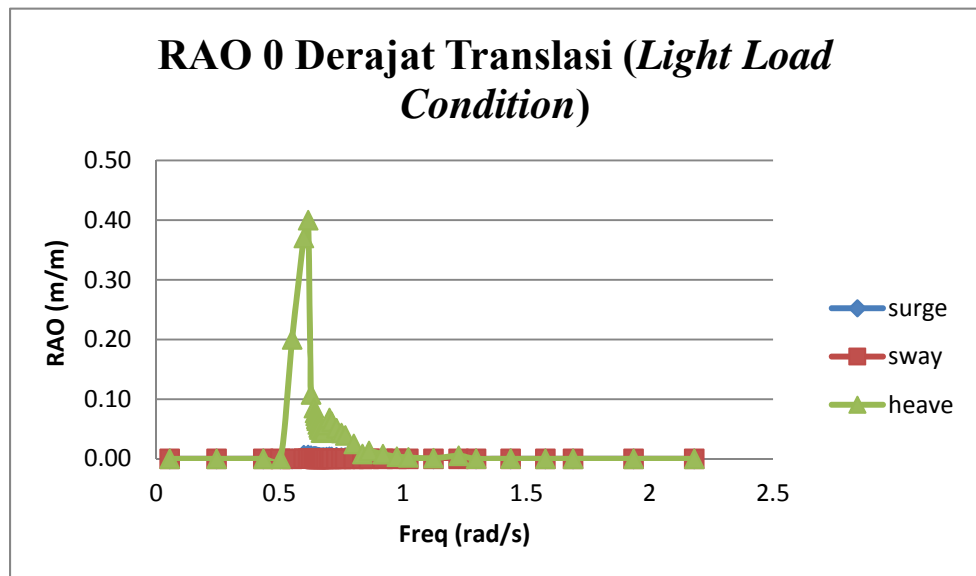


Tabel 4.8 Nilai maksimum RAO FSO Ladinda tertambat *full load condition*

Moda Gerakan	Unit	RAO Maksimum				Max
		0 deg	45 deg	90 deg	180 deg	
Surge	m/m	0.0065	0.0577	0.0422	0.0580	0.0580
Sway	m/m	0.0001	0.1815	0.0007	0.0013	0.1815
Heave	m/m	0.1293	1.0248	0.9547	1.0915	1.0915
Roll	deg/m	0.0007	0.0035	0.0726	0.0153	0.0726
Pitch	deg/m	0.0559	0.2800	0.1531	0.4540	0.4540
Yaw	deg/m	0.0000	0.0615	0.0001	0.0004	0.0615

Berdasarkan Gambar 4.26 sampai Gambar 4.33 dan Tabel 4.8 di atas dapat dilihat bahwa *surge* tertinggi ialah sebesar 0.0580 (m/m) yaitu pada *heading* 180°, *sway* tertinggi pada *heading* 45° sebesar 1.1815 (m/m), dan *heave* tertinggi sebesar 1.0915 (m/m) pada *heading* 180°. Untuk gerak osilasi rotasional *roll* maksimum pada *heading* 90° sebesar 0.0726 (deg/m), *pitch* maksimum sebesar 0.4540 (deg/m) pada *heading* 180°, dan *yaw* maksimum sebesar 0.0615 (deg/m) pada *heading* 45°.

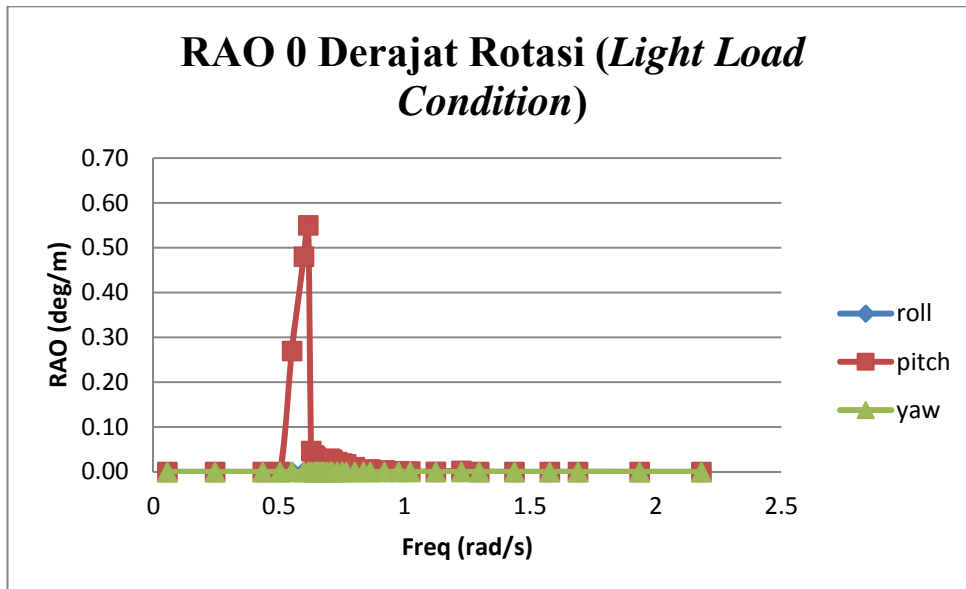
## 2. *Light load Condition*



**Gambar 4.34** Grafik RAO gerakan translasi pada FSO Ladinda kondisi *light load* saat *Mooring* dengan *heading* pembebanan 0 derajat

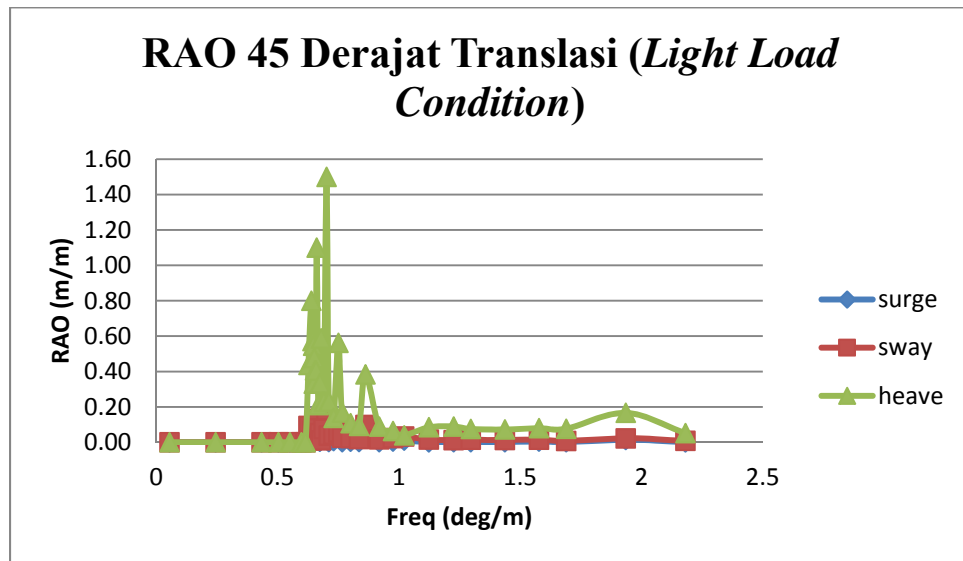
Pada gambar 4.34 adalah Gerakan FSO pada saat tertambat berbeda dengan gerakan FSO saat terapung bebas (free floating). Pada free floating FSO dapat bergerak bebas dan pada saat tertambat FSO memiliki keterbatasan untuk bergerak. Pembebanan arah  $0^\circ$  seperti pada gambar grafik disebutkan gerakan heave memiliki nilai tertinggi sebesar xxx m/m pada frekuensi xxx rad/s. Walaupun arah pembebanan sejajar sumbu-x, namun terbesar adalah pergerakan gerakan translasi sumbu-z karena pada sistem tertambat pergerakan sumbu-x secara translasi dibatasi. Pada frekuensi 0,675 rad/s terjadi penurunan amplitudo gerakan heave dimana nilai gerakan heave sebesar 0,002 m/m dan naik kembali pada nilai amplitudo gerakan sebesar 0,006 m/m pada frekuensi 0,732 rad/s selanjutnya amplitudo gerakan heave turun hingga landai pada nilai 0,00002 m/m hingga frekuensi 2,132 rad/s. Pada kondisi ini nilai frekuensi semakin tinggi maka nilai amplitudo gelombang semakin kecil yang diakibatkan oleh puncak-puncak gelombang yg berurutan sehingga apabila frekuensi

semakin tinggi maka akan memberi efek seperti bangunan laut bergerak pada air yang relatif datar.



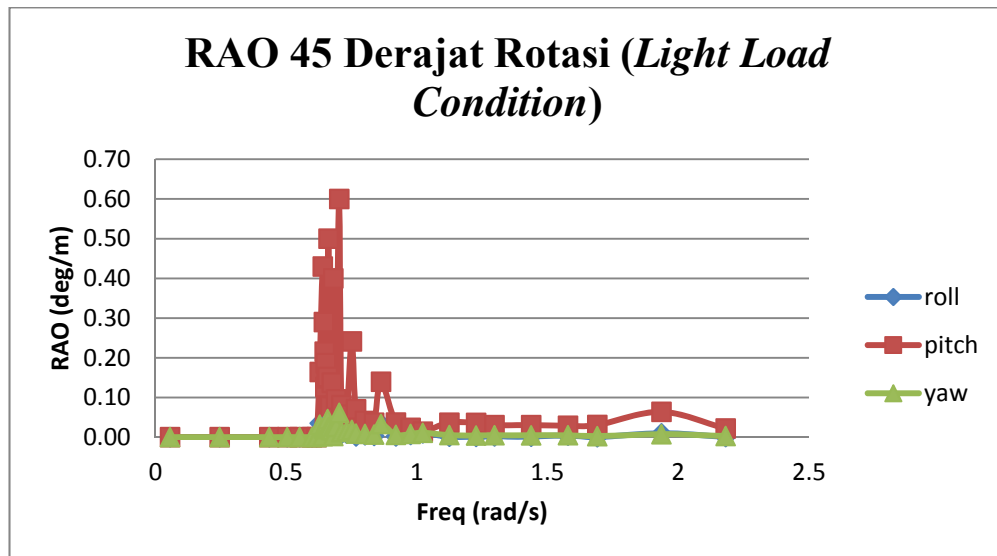
**Gambar 4.35** Grafik RAO gerakan rotasi pada FSO Ladinda kondisi *light load* saat *Mooring* dengan *heading* pembebanan 0 derajat

Pada gambar 4.35 adalah Pada pembebanan  $0^\circ$  dengan gerakan rotasi seperti gambar grafik diatas, perilaku gerakan FSO memiliki gerakan terbesar adalah gerakan pitch. Hal ini mempunyai kesamaan saat terapung bebas karena tower yoke membebaskan FSO bergerak secara rotasional terhadap sumbu-y karena terdapat engsel sehingga gerakan rotasi sumbu-y dibebaskan. Amplitudo gerakan rotasi pada heading  $0^\circ$  tertinggi adalah gerakan pitch yang tertinggi yaitu sebesar 0,5500 deg/m pada frekuensi 0,574 rad/s. Pada frekuensi 0,775 rad/s terjadi penurunan amplitudo gerakan pitch dimana nilai gerakan pitch sebesar 0,00001 deg/m dan semakin tinggi nilai frekuensi maka amplitudo gerakan akan semakin kecil, pada kondis ini nilai frekuensi semakin tinggi maka nilai amplitudo gelombang semakin kecil yang diakibatkan oleh puncak-puncak gelombang yg berurutan sehingga apabila frekuensi semakin tinggi maka akan memberi efek seperti bangunan laut bergerak pada air yang relatif datar.



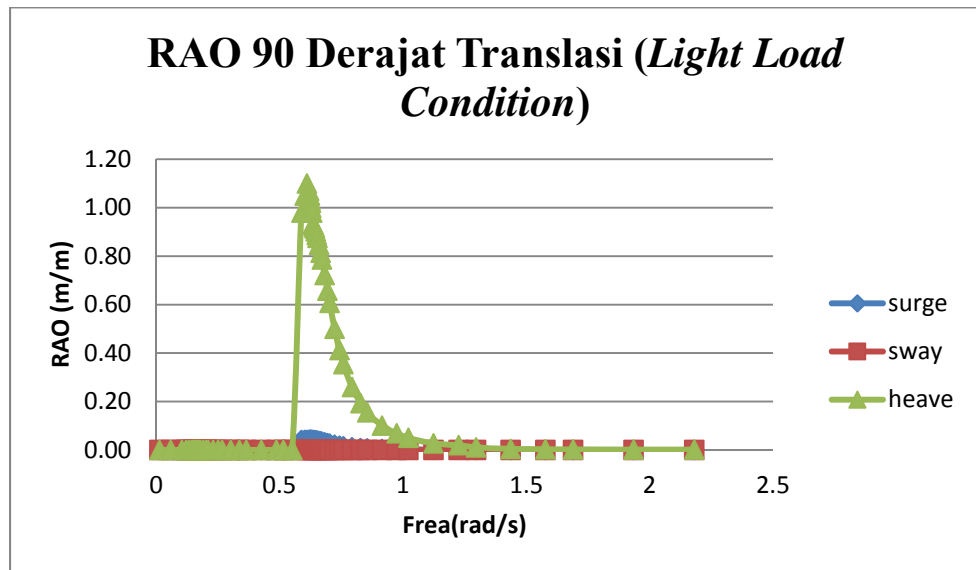
**Gambar 4.36** Grafik RAO gerakan translasi pada FSO Ladinda kondisi *light load* saat *Mooring* dengan *heading* pembebanan 45 derajat

Pada gambar 4.36 adalah Pembebanan heading 45° didominasi oleh gerakan heave sebesar 1,5000 m/m. Pada semua arah pembebanan saat tertambat pada gerakan translasi paling besar berupa heave karena pada sistem tersebut yang paling dibebaskan dari gerakan translasi adalah gerakan translasi sumbu-z dan pada gerakan rotasi dibebaskan pada sumbu-y. Pada heading 45° nilai amplitudo heave naik turun karena heading 45° adalah dimana sudut pembebanan tepat diantara pembebanan arah 0°/180° dan arah pembebanan sudut 90°. Pada frekuensi 0,876 rad/s terjadi penurunan amplitudo gerakan heave dimana nilai gerakan sebesar 0,00001 m/m dan semakin tinggi nilai frekuensi maka amplitudo gerakan akan semakin kecil, pada kondisi ini nilai frekuensi semakin tinggi maka nilai amplitudo gelombang semakin kecil yang diakibatkan oleh puncak-puncak gelombang yg berurutan sehingga apabila frekuensi semakin tinggi makan akan memberi efek seperti bangunan laut bergerak pada air yang relatif datar.



**Gambar 4.37** Grafik RAO gerakan rotasi pada FSO Ladinda kondisi *light load* saat *Mooring* dengan *heading* pembebanan 45 derajat

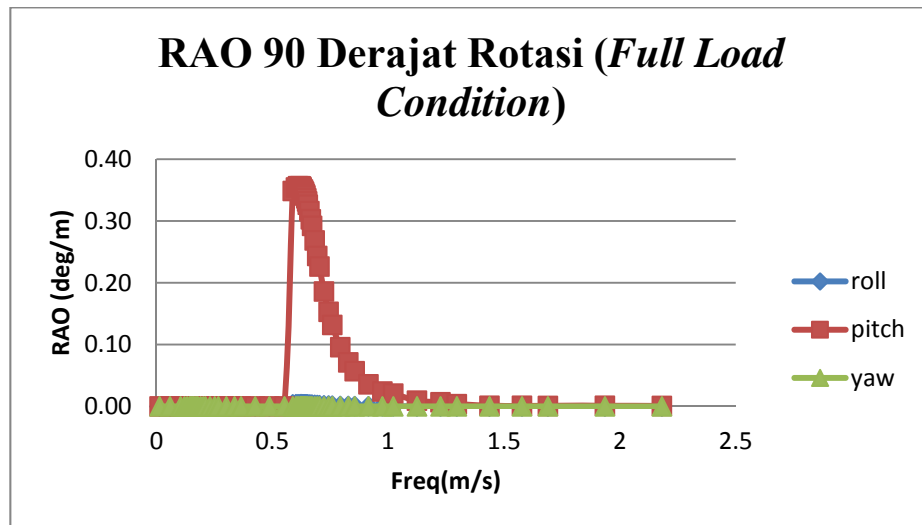
Pada gambar 4.37 adalah Gerakan rotasi FSO saat pembebanan 45 ° tertinggi adalah gerakan pitch atau gerakan pada sumbu-y. Pada sistem ini juga membebaskan pergerakan rotasi terhadap sumbu-x atau gerakan roll, tapi tidak sebas pergerakan rotasi sumbu-y atau gerakan pitch. Nilai gerakan pitch pada heading 45 ° ini adalah sebesar 0,6000 deg/m. Pada frekuensi 0,921 rad/s terjadi penurunan amplitudo gerakan pitch dimana nilai gerakan pitch sebesar 0,00001 deg/m dan semakin tinggi nilai frekuensi maka amplitudo gerakan akan semakin kecil, pada kondis ini nilai frekuensi semakin tinggi maka nilai amplitudo gelombang semakin kecil yang diakibatkan oleh puncak-puncak gelombang yg berurutan sehingga apabila frekuensi semakin tinggi makan akan memberi efek seperti bangunan laut bergerak pada air yang relatif datar.



**Gambar 4.38** Grafik RAO gerakan translasi pada FSO Ladinda kondisi *light load* saat *Mooring* dengan *heading* pembebanan 90 derajat

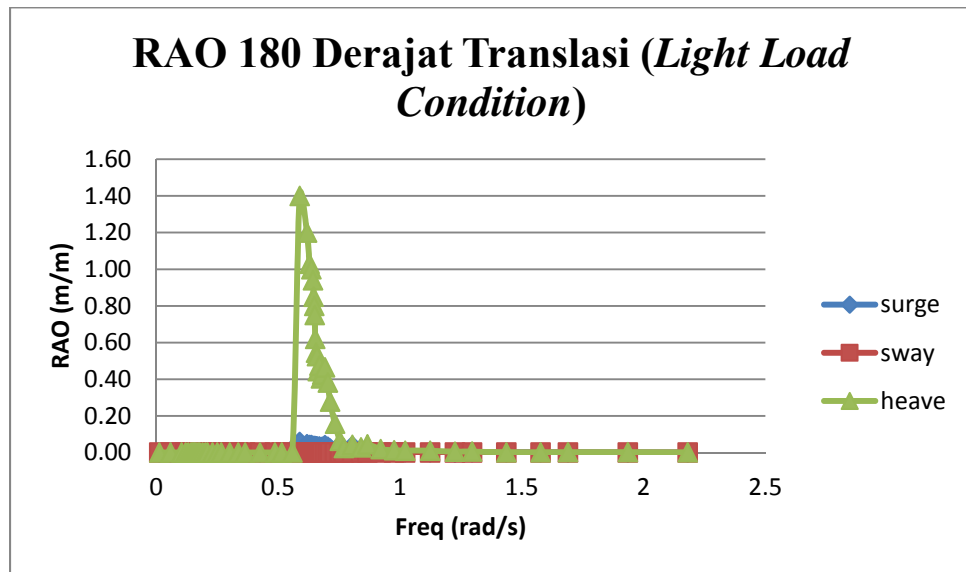
Pada gambar 4.38 adalah Gambar grafik diatas dapat dilihat gerakan yang dominan adalah gerakan heave atau pada sumbu-z. Pembebanan arah  $90^\circ$  secara translasi terbesar adalah gerakan heave yaitu sebesar 1,1000 m/m pada frekuensi 0,611 rad/s. Pada frekuensi 0,985 rad/s terjadi penurunan amplitudo gerakan heave dimana nilai gerakan surge sebesar 0,00001 m/m dan semakin tinggi nilai frekuensi maka amplitudo gerakan akan semakin kecil, pada kondisi ini nilai frekuensi semakin tinggi maka nilai amplitudo gelombang semakin kecil yang diakibatkan oleh puncak-puncak gelombang yg berurutan sehingga apabila frekuensi semakin tinggi makan akan memberi efek seperti bangunan laut bergerak pada air yang relatif datar.





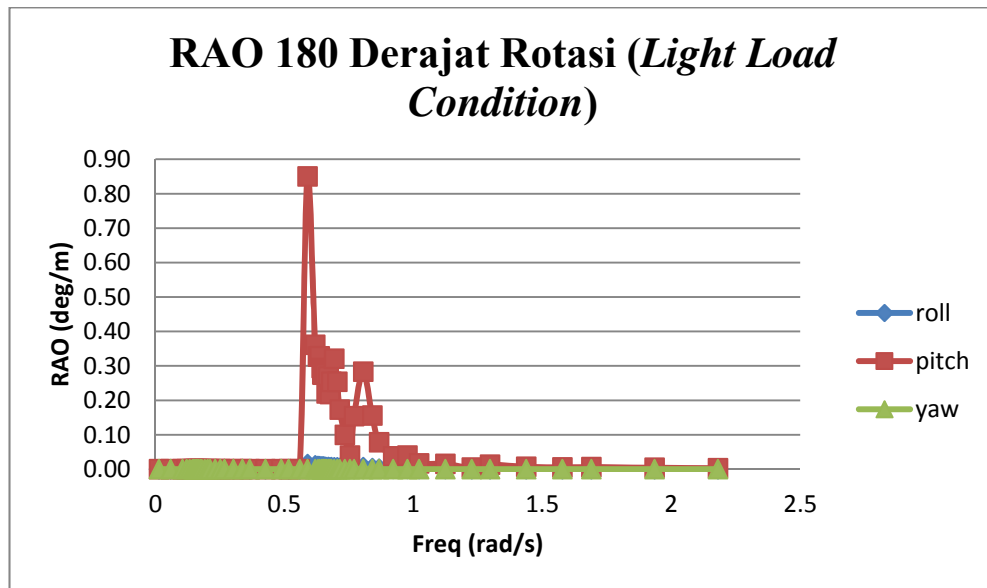
**Gambar 4.39** Grafik RAO gerakan rotasi pada FSO Ladinda kondisi *light load* saat *Mooring* dengan *heading* pembebanan 90 derajat

Pada gambar 4.39 adalah Gambar grafik diatas dapat dilihat gerakan paling besar adalah gerakan pitch atau gerakan rotasi pada sumbu-y dengan nilai 0,3563 deg/m. Setelah nilai tertinggi pitch nilai terbesar selanjutnya adalah gerakan roll dengan nilai 0,0015 deg/m dan selanjutnya adalah gerakan yaw dengan nilai 0,00004 deg/m. Pada gerakan pitch dapat dilihat semakin tinggi frekuensi gelombang mengakibatkan nilai amplitudo gerakan semakin kecil hingga gerakan pada bangunan laut dengan nilai 0,00003 m/m pada frekuensi 2,438 rad/s. Pada nilai frekuensi semakin tinggi maka nilai amplitudo gelombang semakin kecil yang diakibatkan oleh rapatnya puncak-puncak gelombang yg berurutan sehingga apabila frekuensi semakin tinggi makan akan memberi efek seperti bangunan laut bergerak pada air yang relatif datar.



**Gambar 4.40** Grafik RAO gerakan translasi pada FSO Ladinda kondisi *light load* saat *Mooring* dengan *heading* pembebanan 180 derajat

Pada gambar 4.40 adalah Gambar grafik diatas dapat dilihat gerakan translasi terbesar adalah gerakan heave atau gerakan translasi sumbu-z yaitu sebesar 1.4000 m/m selanjutnya gerakan surge yaitu sebesar 0,0577 m/m dan terakhir yaitu gerakan sway yaitu sebesar 0,0013 m/m. selanjutnya nilai amplitudo gerakan terbesar gerakan heave yaitu sebesar 1,4000 m/m pada frekuensi 0,731 rad/s dan amplitudo gerakan heave turun hingga drastis sebesar 0,00002 m/m pada frekuensi 0,835 rad/s dan selanjutnyapada frekuensi tinggi amplitudo gerakan semakin landai yang diakibatkan oleh puncak-puncak gelombang yang akhirnya seperti bangunan laut berada diatas air yang relatif datar.



**Gambar 4.41** Grafik RAO gerakan rotasi pada FSO Ladinda kondisi *light load* saat *Mooring* dengan *heading* pembebanan 180 derajat

Pada gambar 4.41 adalah Gambar grafik diatas merupakan gerakan FSO arah pembebanan 180° dengan gerakan rotasi gerakan terbesar adalah gerakan pitch sebesar 0,8500 deg/m , gerakan besar kedua adalah gerakan roll sebesar 0,0153 deg/m daan terakhir adalah gerakan yaw sebesar 0,0004 deg/m. Pada gerakan terbesar pitch dapat dilihat semakin tinggi frekuensi gelombang mengakibatkan nilai amplitudo gerakan pitch turun pada bangunan laut dengan nilai 0,006 m/m pada frekuensi 0,632 rad/s dan naik kembali pada nilai amplitudo gerakan sebesar 0,331 deg/m pada frekuensi 0,845 rad/s. Pada nilai frekuensi semakin tinggi maka nilai amplitudo gelombang semakin kecil yang diakibatkan oleh rapatnya puncak-puncak gelombang yg berurutan sehingga apabila frekuensi semakin tinggi makan akan memberi efek seperti bangunan laut bergerak pada air yang relatif datar.

**Tabel 4.9** Nilai maksimum RAO FSO Ladinda tertambat *light load condition*

Moda Gerakan	Unit	RAO Maksimum				Max
		0 deg	45 deg	90 deg	180 deg	
Surge	m/m	0.0065	0.0577	0.0422	0.0852	0.0852
Sway	m/m	0.0001	0.1815	0.0007	0.0013	0.1815
Heave	m/m	0.4000	1.2000	1.1000	1.3000	1.3000
Roll	deg/m	0.0007	0.0726	0.0015	0.0153	0.0726
Pitch	deg/m	0.5500	0.6000	0.3563	0.8500	0.8500
Yaw	deg/m	0.0000	0.0735	0.0000	0.0004	0.0735

Berdasarkan Gambar 4.34 sampai Gambar 4.41 dan Tabel 4.9 di atas dapat dilihat bahwa *surge* tertinggi ialah sebesar 0.0852 (m/m) yaitu pada *heading* 0°, *sway* tertinggi pada *heading* 90° sebesar 0.1815 (m/m), dan *heave* tertinggi sebesar 1.3000 (m/m) pada *heading* 180°. Untuk gerak osilasi rotasional *roll* maksimum pada *heading* 90° sebesar 0.0856 (deg/m), *pitch* maksimum sebesar 0.8500 (deg/m) pada *heading* 180°, dan *yaw* maksimum sebesar 0.0735 (deg/m) pada *heading* 45°.

#### 4.7 Analisis Spektra Gelombang

Pemilihan spektrum gelombang untuk menganalisa respon dari pada gerakan struktur pada gombang acak (irregular) adalah berdasarkan dari kondisi laut sebenarnya yang akan dianalisis. Dari beberapa jenis spektrum gelombang yang akan digunakan dalam penelitian ini adalah Spektrum JONSWAP. Pemilihan jenis spektrum JONSWAP ini didasarkan pada penentuan yang telah terdapat di Chakrabarti (1987) yang telah dibahas pada BAB II. Selain itu, pada DNV RP C205 juga dijelaskan bahwa spektrum JONSWAP diaplikasikan pada perairan dengan :  $T_p / (H_s)^{1/2} \leq 3.6$  ,  $\gamma = 5$

Untuk perairan Selat Malaka, nilai  $T_p / (H_s)^{1/2} = 5 / (1.9)^{1/2} = 3,63$

Karena hasilnya lebih dari persyaratan maka memperoleh nilai gammanya

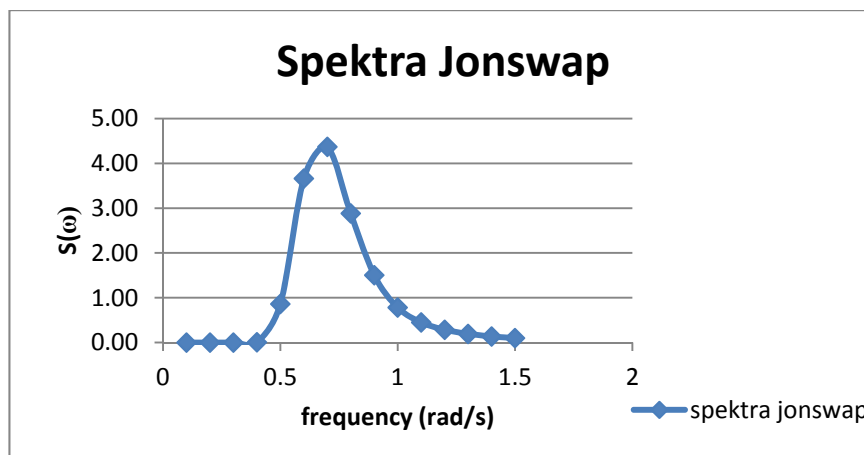
menggunakan persamaan sebagai berikut:

$$\gamma = \exp(5.75 - 1.15T_p / (H_s)^{1/2})$$

Sehingga:

$$\gamma = \exp(5.75 - 1.15 \times 5 / (1.9)^{1/2}) = 2.29$$

Berikut adalah grafik spektrum gelombang untuk perairan Selat Malaka tempat FSO beroperasi terdapat pada **Gambar 4.42**:



**Gambar 4.42** Spektrum Jonswap Perairan Selat Malaka dengan  $H_s = 1,98$  m

Pada analisis akan ditentukan respon struktur dari FSO sebagai respon kerapatan energi pada struktur akibat gelombang. Spektra respons didapatkan dengan cara mengkalikan harga spektra gelombang dengan RAO kuadrat. Maka grafik respon struktur pada enam derajat kebebasan yang dihasilkan adalah sebagai berikut :

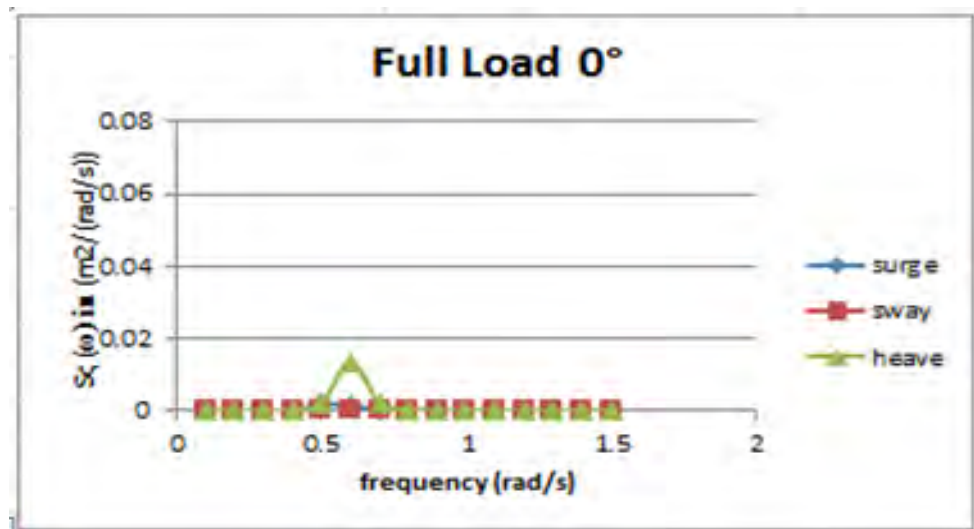
$$\text{RAO}^2 \times S(\omega) = S_r(\omega)$$

**Gambar 4.43** Langkah perhitungan mencari respon spektra

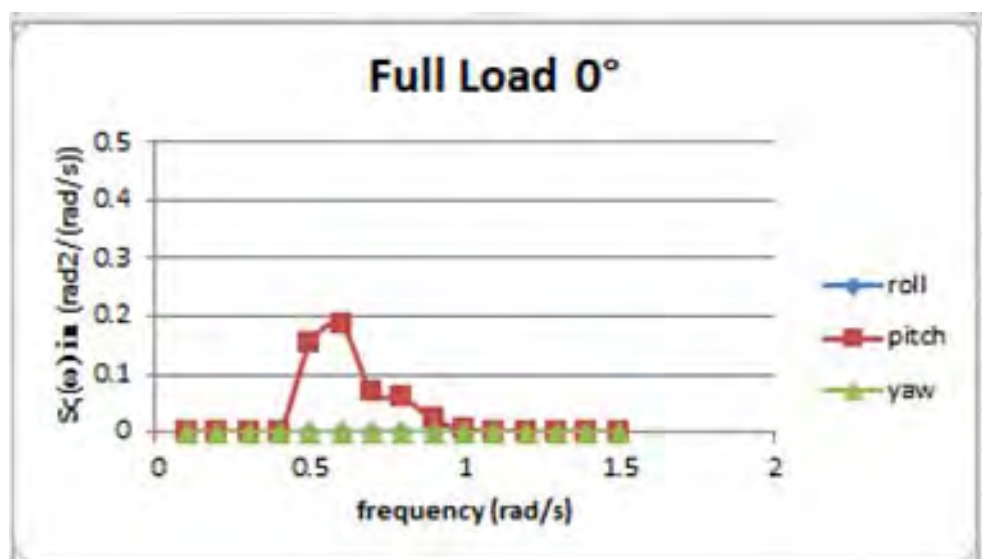
Sama halnya dengan penjelasan analisis perilaku gerak di gelombang regular (RAO) pada bahasan sebelumnya, penjelasan hasil analisis perilaku gerak di gelombang acak juga akan dijabarkan sesuai dengan kondisi muatan yang

ditinjau yaitu pada kondisi full load dan light load dengan arah pembebanan  $0^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $90^\circ$ , dan  $180^\circ$ . Pada gambar 4.43- 4.44 adalah salah satu hasil respon spektra gerakan translasi dan rotasi pada kondisi full load dengan arah pembebanan  $0^\circ$ .

Hasil respon spektra gerakan translasi dan rotasi dengan kondisi muatan dan arah pembebanan lainnya dapat dilihat pada lampiran.



**Gambar 4.43** Grafik respon spektra gerakan translasi pada FSO Ladinda saat kondisi *full load* terapung bebas dengan *heading* pembebanan 0 derajat



**Gambar 4.44** Grafik respon spektra gerakan rotasi pada FSO Ladinda saat kondisi *full load* terapung bebas dengan *heading* pembebanan 0 derajat



#### 4.8 Analisis *Tension Force*

Pada analisa dibawah ini adalah analisa untuk menghitung gaya-gaya yang bekerja pada *yoke arm*. Gaya-gaya yang bekerja pada *yoke arm* adalah *tension force* dimana *tension force* pada *yoke arm* terjadi akibat pergerakan FSO Ladinda yang menjadikan *yoke arm* bergerak karena angsel (*joint*) yang bekerja pada sambungan antara FSO maupun pada *Tower Mooring System*. Untuk mendapatkan *tension force* dari *yoke* menggunakan *software* Ansys Aqwa 16.0 selama 3 jam, didapatkan nilai *tension* untuk struktur tubular berongga yang terdapat pada tabel 4.10-tabel 4.14 merupakan hasil analisis *tension force* untuk kondisi FSO *Full Load* dan *Light Load* arah pembebanan 0°, 45°, 90°, dan 180° Hasil analisis *tension* untuk kondisi muatan dan arah pembebanan yang lainnya dapat dilihat pada lampiran dibawah ini :

Tabel 4.10 Hasil simulasi *tension* pada arah pembebanan gelombang 0°

Tension Force (N)	Tension			
	FSO FULL LOAD		FSO LIGHT LOAD	
	RIGHT	LEFT	RIGHT	LEFT
Fx	409.065	422.108	12208.846	4234.994
Fy	570.563	341.515	29283.760	27797.215
Fz	3716.565	3719.293	8214.944	9800.980

Tabel 4.11 Hasil simulasi *tension* pada arah pembebanan gelombang 45°

Tension Force (N)	Tension			
	FSO FULL LOAD		FSO LIGHT LOAD	
	RIGHT	LEFT	RIGHT	LEFT
Fx	888.188	885.852	8564.951	12958.897
Fy	941.272	920.274	23674.133	22824.080
Fz	4895.705	4910.466	19612.737	19434.907

Tabel 4.12 Hasil simulasi tension pada arah pembebanan gelombang 90°

Tension Force (N)	Tension			
	FSO FULL LOAD		FSO LIGHT LOAD	
	RIGHT	LEFT	RIGHT	LEFT
Fx	11909.067	11889.411	81676.250	86453.000
Fy	12579.457	12701.464	43096.813	46091.375
Fz	2641.025	2530.581	50669.875	52101.750

Tabel 4.13 Hasil simulasi tension pada arah pembebanan gelombang 180°

Tension Force (N)	Tension			
	FSO FULL LOAD		FSO LIGHT LOAD	
	RIGHT	LEFT	RIGHT	LEFT
Fx	656.762	656.821	48133.520	48721.172
Fy	350.954	895.365	15961.262	20440.981
Fz	79712.782	79412.164	86774.313	99906.000

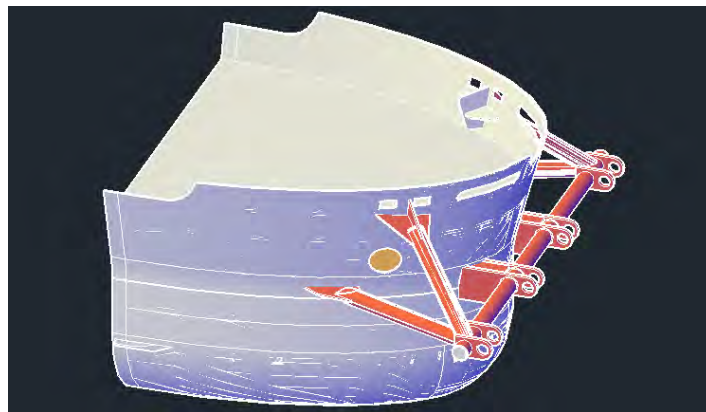
Tabel 4.14 Hasil perhitungan *Tension Force* terbesar pada *yoke arm*

Arah gaya	Tension (N)	Heading (deg)	Kondisi
Fx	86453.000	90	LL
Fy	46091.375	90	LL
Fz	99906.000	180	LL

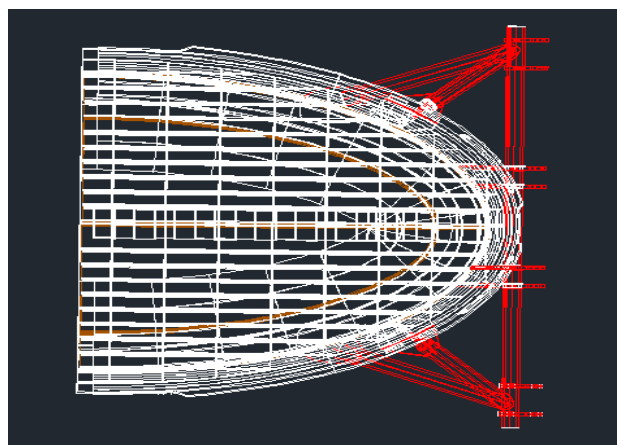
Berdasarkan tabel diatas dapat diketahui bahwa *tension force* pada *yoke arm* yang menghubungkan antara FSO Ladinda dengan *Tower Mooring System*. *Tension* paling besar yaitu 99906,00 N. Hasil *tension* terbesar tersebut merupakan pengaruh dari gerakan *surge*, *heave* dan *sway* serta beban muatan struktur akibat heading pada sudut 180°. Nilai *tension force yoke arm* terbesar nantinya akan digunakan untuk pembebanan pada pemodelan lokal konstruksi *yoke arm* dengan *hull* FSO Ladinda.

#### 4.9 Konstruksi Sambungan Yoke Arm dengan FSO

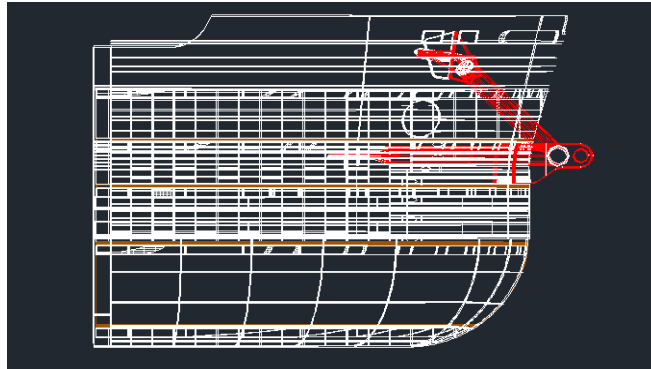
Seperti yang dijelaskan bahwa konstruksi Sambungan *Yoke Arm* dengan FSO Ladinda dimodelkan secara lokal dengan *Autocad* 3D dan untuk analisis kekuatannya menggunakan *software* Ansys Mechanical 16.0. Pemodelan konstruksi sambungan *yoke arm* dengan FSO dapat dilihat pada Gambar 4.76-4.78 sebagai berikut:



**Gambar 4.45** Hasil pemodelan sambungan *yoke arm* dan FSO pada Autocad – tampak *isometri*

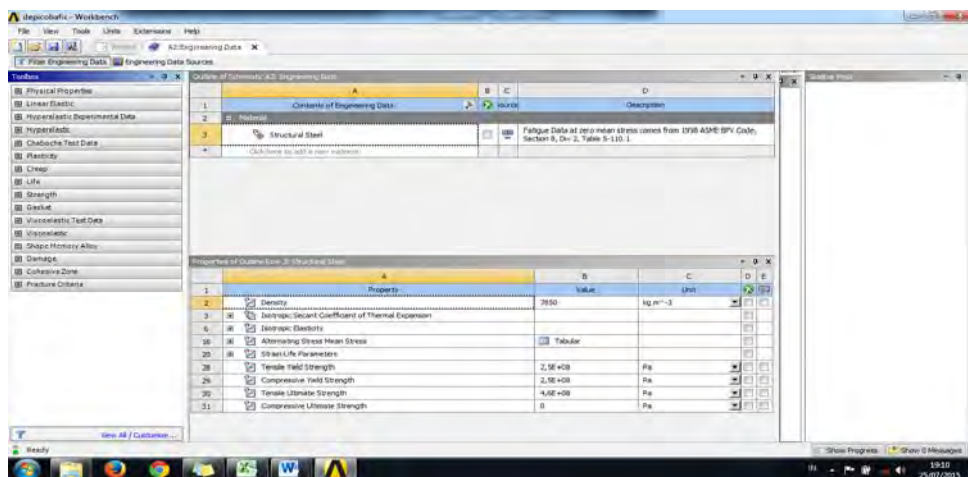


**Gambar 4.46** Hasil pemodelan sambungan *yoke arm* dan FSO pada Autocad – tampak atas



**Gambar 4.47** Hasil pemodelan sambungan *yoke arm* dan FSO pada Autocad – tampak samping

Struktur yang dimodelkan pada Ansys Structural 16.0 meliputi konstruksi sambungan *Yoke Arm* dan FSO yang terdiri dari bagian konstruksi bagian depan kapal yang diambil dari 3 kali diameter dari *tubular* atas, bawah, kanan, dan kiri sebagai batas pemodelan untuk bagian depan kapal dan dimodelkan juga sambungan yang terdapat pada sambungan *yoke arm* dengan FSO. Selain itu, pada gambar 4.48 bisa dilihat juga dilakukan pemilihan material untuk struktur, yaitu Baja ASTM A36.



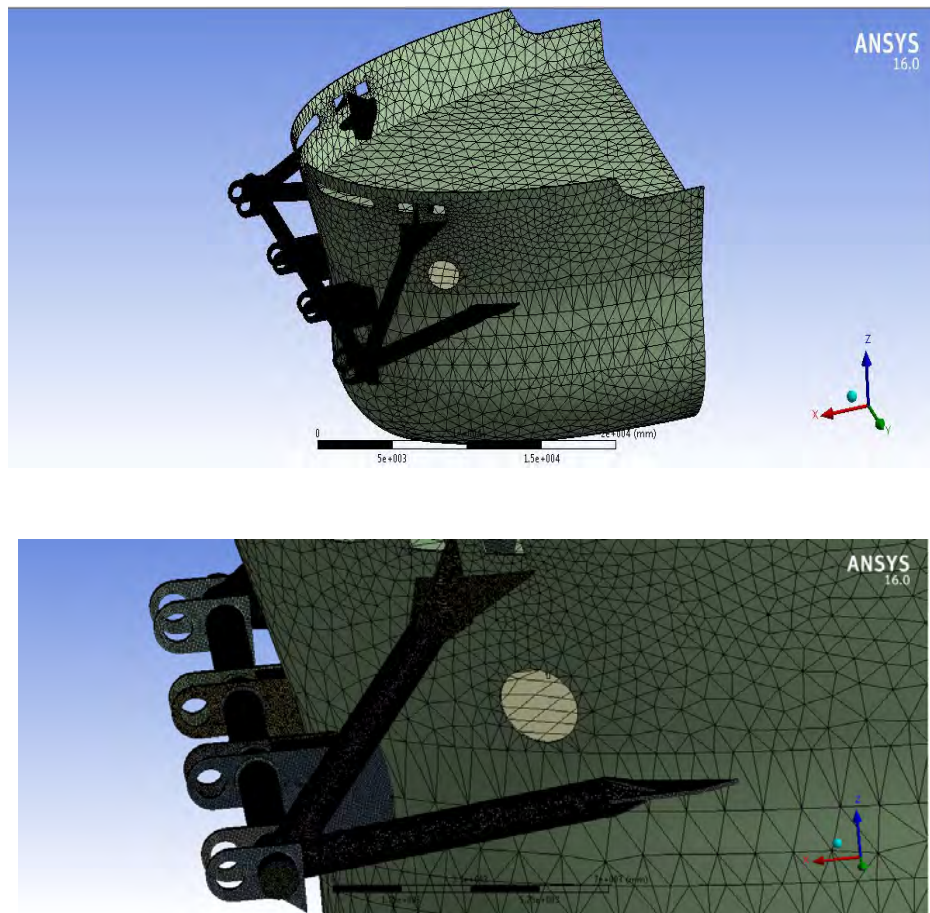
**Gambar 4.48** Material property untuk pemodelan struktur global

#### 4.10 Meshing dan Sensitivity Analysis

*Sensitivity Analysis* dilakukan untuk mengecek apakah tegangan yang dihasilkan dari hasil *running* sudah benar atau sudah mendekati nilai kebenaran. Pada Tugas Akhir ini, uji *sensitivity* dilakukan dengan cara variasi kerapatan

*meshing*. Berdasarkan variasi kerapatan *meshing* tersebut akan didapatkan hasil *equivalent stress* atau yang lebih dikenal dengan *Von Mises Stress*. Dari beberapa hasil tegangan yang dihasilkan dianalisis hingga didapat perbedaan hasil yang kurang dari 5%.

Pada Tugas Akhir ini dilakukan *running* pada kondisi muatan FSO light dengan arah pembebanan  $180^\circ$ , karena memiliki tegangan yang maksimum dari arah pembebanan lainnya. Selain itu, juga dilakukan *running* dengan 5 kondisi kerapatan *meshing*.



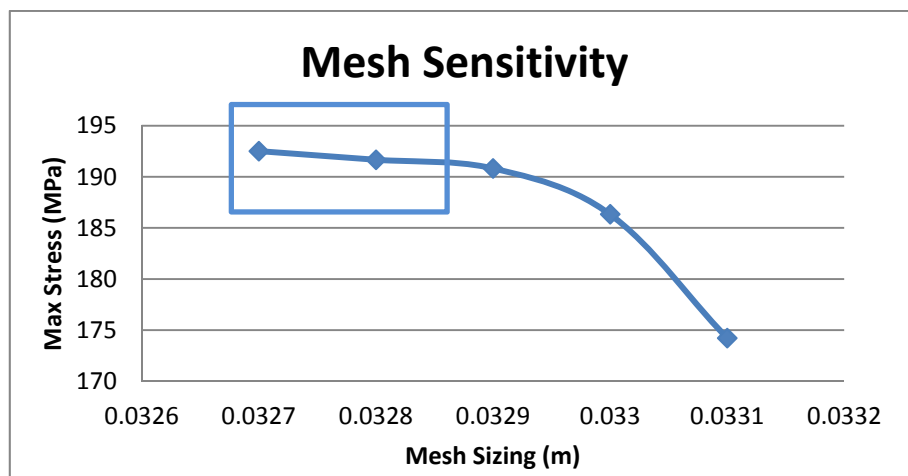
**Gambar 4.49** Model dengan *meshing* konstruksi sambungan *yoke arm* dengan *hull* FSO

Gambar 4.49 merupakan contoh *mesh* pada struktur. *Meshing* dilakukan dengan kerapatan 0.0331; 0.0330; 0.0329; 0.0328; dan 0.0327 m. Berdasarkan

variasi *mesh* yang dilakukan, didapatkan tabulasi *mesh* yang terdapat pada Tabel 4.15 sebagai berikut:

**Tabel 4.15** Tabulasi hasil *Maximum von Mises Stress* untuk variasi kerapatan *meshing*

<i>Condition</i>	<i>Mesh Sizing(m)</i>	<i>Max Stress (MPa)</i>	<i>Error (%)</i>
1	0,0331	174,22	
2	0,0330	183,34	0,09
3	0,0329	190,82	0,04
4	0,0328	191,67	0,01
5	0,0327	192,52	0,01



**Gambar 4.50** Sensitivitas model konstruksi Sambungan *yoke arm*

Berdasarkan Tabel 4.13 dan grafik pada Gambar 4.50 dapat disimpulkan bahwa struktur Sambungan *yoke arm* dengan FSO Ladinda dapat dengan baik dimodelkan pada ukuran *mesh* 0.0327 meter karena hasil perhitungan *error* untuk *mesh* ini kurang dari 5%.



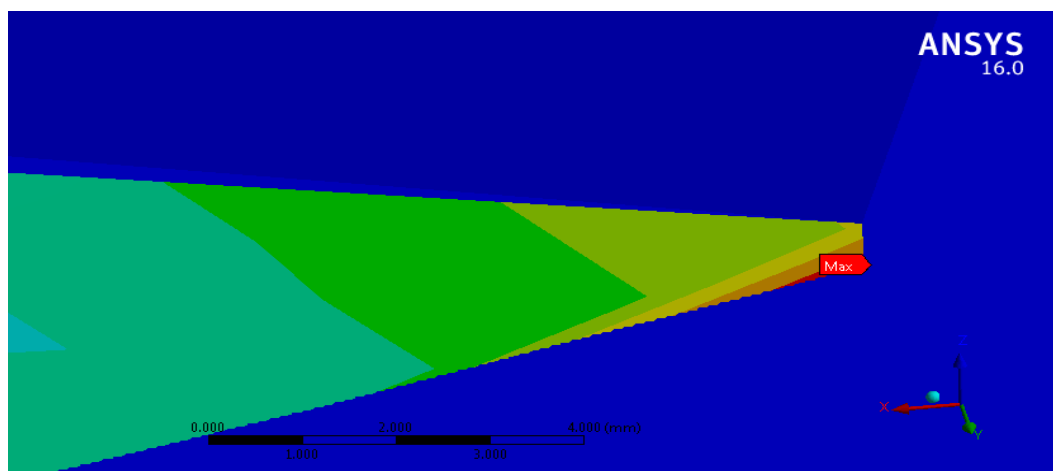
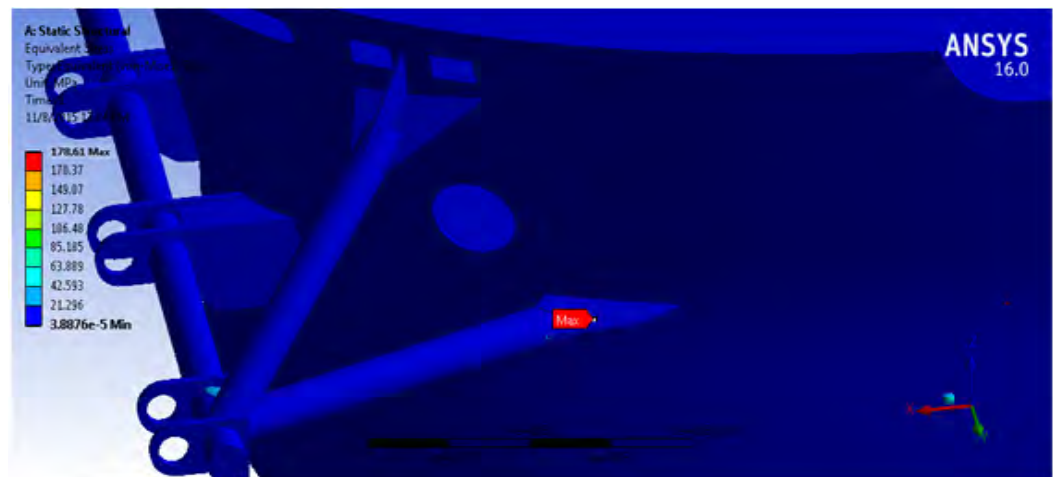
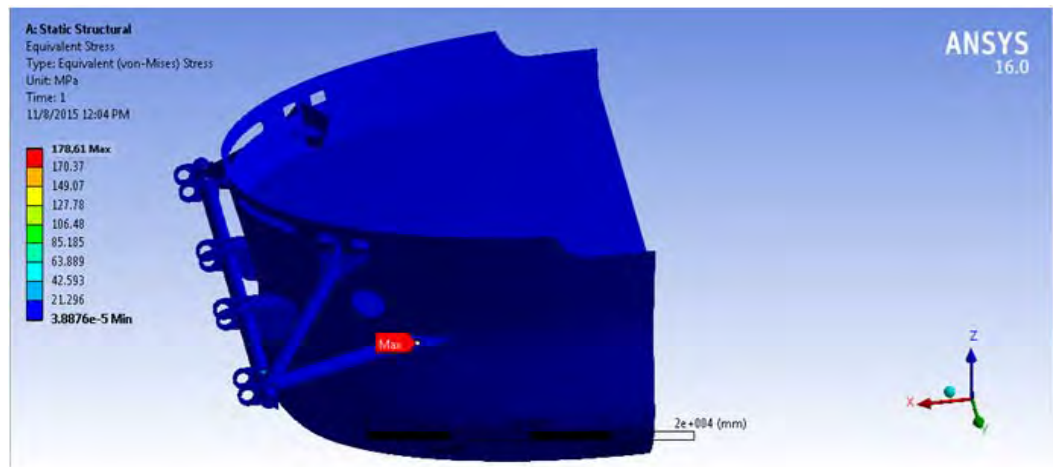
#### 4.11 Analisis Tegangan Lokal Konstruksi Sambungan Yoke Arm dengan FSO Ladinda

Pada analisis lokal disini dimodelkan bagian FSO depan sebagian tersambung dengan sambungan yoke arm. Analisis ini *constraint* pada pemodelan yang digunakan yaitu pada sisi potongan konstruksi FSO yang terpotong di fix dan diberi beban tension yoke arah keluar pada pengait yang berada diujung sambungan yang tersambung langsung dengan yoke arm.

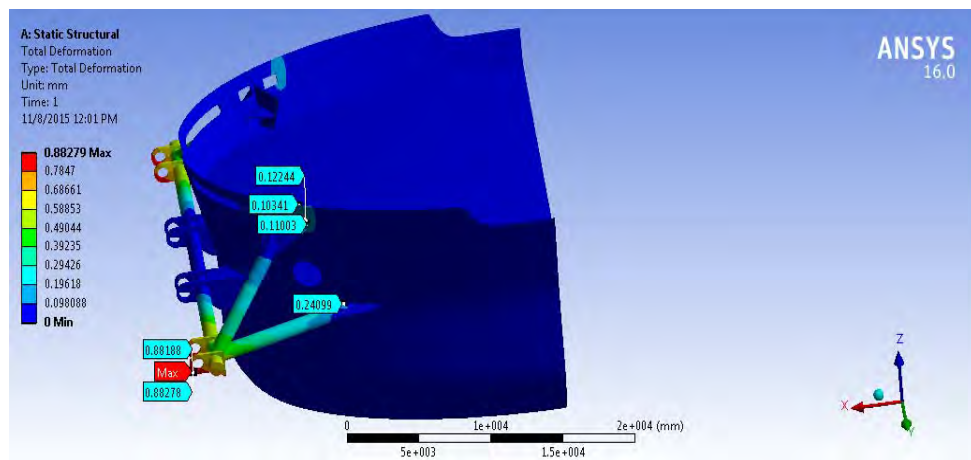
Berdasarkan hasil *meshing* dan pembebanan yang dilakukan dari *running*, menunjukkan bahwa tegangan maksimum terjadi pada bracket sambungan horizontal yoke arm dan didapatkan hasil tegangan maksimum sebesar 178,61 Mpa, untuk hasil tegangan rata-rata sebesar 21,296 Mpa dan deformasi maksimum sebesar 0,883 mm pada bagian pengait dari engsel *yoke arm*, tetapi konsentrasi dari analisis ini ingin mengetahui kekuatan dari sambungan *yoke arm* yang langsung bersinggungan dengan *hull* FSO Ladinda, sehingga deformasi maksimum sambungan dengan *hull* sebesar 0,237 mm.

Berdasarkan material yang digunakan, yaitu baja A36 dengan nilai *yield strength* 250 MPa dan mengacu pada ketentuan ABS “*Safehull-Dynamic Loading Approach for FPSO Systems*” yang menganjurkan tegangan *Von Mises* tidak boleh melebihi 90% dari *yield strength material*, yaitu 225 MPa, maka struktur ini dapat dikatakan aman untuk beroperasi. Hasil analisis dapat dilihat pada Gambar 4.79-4.82.

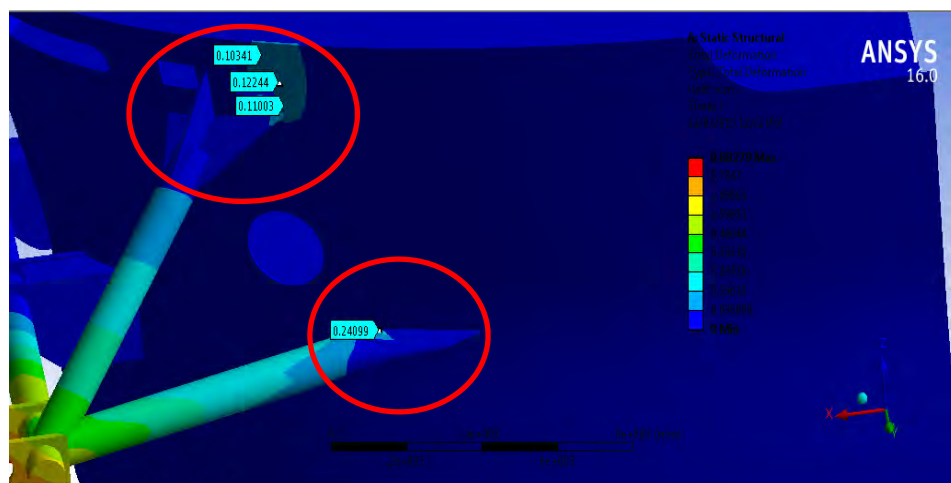
Untuk deformasi, nilai deformasi terbesar yang terjadi pada struktur yang telah dimodelkan adalah sebesar 0,883 mm. Nilai ini masih lebih kecil jika dibandingkan dengan syarat deformasi maksimum yang tercantum dalam ABS “*Shipbuilding and Repair Quality Standard for Hull Structures during Construction*” yaitu 8 mm. Dengan demikian, struktur dapat dinyatakan aman untuk terus beroperasi.



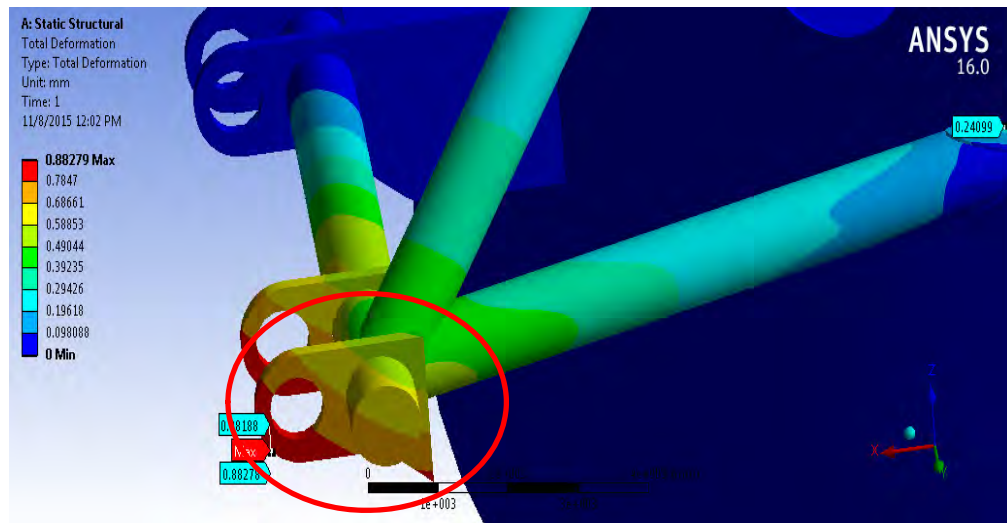
**Gambar 4.51** Tegangan maksimum pada konstruksi sambungan *yoke arm* dengan FSO  
 Ladinda



**Gambar 4.52** Deformasi maksimum pada konstruksi sambungan *yoke arm* dengan FSO Ladinda



**Gambar 4.53** Deformasi pada konstruksi sambungan *yoke arm* dengan *hull* FSO Ladinda



**Gambar 4.54** Deformasi pada konstruksi sambungan *yoke arm* dengan pengait *yoke arm*

*(halaman sengaja dikosongkan)*

## BAB V

### KESIMPULAN DAN SARAN

#### 5.1 Kesimpulan

Kesimpulan yang dapat dibuat berdasarkan pengerjaan Tugas Akhir ini adalah :

1. Respon struktur FSO Ladinda akibat beban gelombang pada saat *free floating*, adalah sebagai berikut :
  - RAO FSO Ladinda, nilai terbesar terjadi pada kondisi *full* dengan *surge* terbesar 2.0198 m/m pada heading 0°, *sway* terbesar 3.0171 m/m pada heading 90°, *heave* terbesar 1.0700 m/m pada heading 180°, *roll* terbesar 1.8130 °/m pada heading 90°, *pitch* terbesar 0.6198 °/m pada heading 0°, *yaw* terbesar 0.9515 °/m pada heading 45°.
  - RAO FSO Ladinda, nilai terbesar terjadi pada kondisi *light* dengan nilai *surge* 2.2755 m/m pada heading 0°, *sway* 3.1571 m/m pada heading 90°, *heave* 1.3500 m/m pada heading 180°, *roll* 6.6755 °/m pada heading 90°, *pitch* 0.6409 °/m pada heading 180°, *yaw* 0.9298 °/m pada heading 45°.
2. Respon struktur FSO Ladinda akibat beban gelombang pada saat *mooring*, adalah sebagai berikut :
  - RAO FSO Ladinda, nilai terbesar terjadi pada kondisi *full* dengan *surge* terbesar 0.0580 m/m pada heading 180°, *sway* terbesar 1.1815 m/m pada heading 45°, *heave* terbesar 1.0915 m/m pada heading 180°, *roll* terbesar 0.0726 °/m pada heading 90°, *pitch* terbesar 0.4540 °/m pada heading 180°, *yaw* terbesar 0.0615 °/m pada heading 45°.
  - RAO FSO Ladinda, nilai terbesar terjadi pada kondisi *light* dengan *surge* terbesar 0.0852 m/m pada heading 0°, *sway* terbesar 0.1815 m/m pada heading 90°, *heave* terbesar 1.3000 m/m pada heading 180°, *roll* terbesar 0.0856 °/m pada heading 90°, *pitch* terbesar 0.8500 °/m pada heading 180°, *yaw* terbesar 0.0735 °/m pada heading 45°.



3. Hasil *tension force yoke arm* terbesar yang menghubungkan antara FSO Ladinda dengan *Tower Mooring System* dari hasil simulasi terjadi *tension force* yang dihasilkan dari yoke arm dengan nilai sebesar 99.906 N dengan kondisi FSO muatan kosong (*Light Load Condition*) dan arah pembebanan heading 180°. Berdasarkan hasil pemodelan struktur sambungan yoke arm dengan FSO Ladinda dengan pembebanan sesuai *tension force* pada yoke arm yang diakibat dari pergerakan FSO Ladinda didapatkan tegangan maksimum sebesar 178,61 MPa dengan deformasi 0,883 mm, ditinjau pada tegangan 178,61 didapatkan terjadi pada sambungan tubular dengan bracket yang terletak pada hull FSO Ladinda dan deformasi maksimum sebesar 0,883 derdapat pada ujung pengait engsel pada sambungan sedangkan deformasi yang ingin dtinjau yaitu pada hull FSO Ladinda didapatkan nilai sebesar 0,237 mm. Nilai tegangan maksimum tersebut masih lebih kecil jika dibandingkan dengan tegangan ijin yang dianjurkan oleh ABS "*Safehull-Dynamic Loading Approach for FPSO Systems*" sebesar 225 MPa. Dan Nilai deformasi yang dihasilkan juga masih lebih kecil jika dibandingkan dengan syarat deformasi maksimum yang tercantum dalam ABS "*Shipbuilding and Repair Quality Standard for Hull Structures during Construction*" yaitu 8 mm. Dengan demikian, dapat disimpulkan bahwa konstruksi sambungan yoke arm dengan FSO Ladinda masih aman untuk beroperasi.

## 5.2 Saran

1. Perlu dilakukan variasi sudut pembebanan yang lebih kecil intervalnya untuk menganalisa lebih detail.
2. Untuk analisa lebih spesifik dalam penentuan lokal maksimum konstruksi Yoke Arm pada FSO Ladinda, diperlukan pemodelan lebih detail hingga memodelkan *collision bulkhead*.

## DAFTAR PUSTAKA

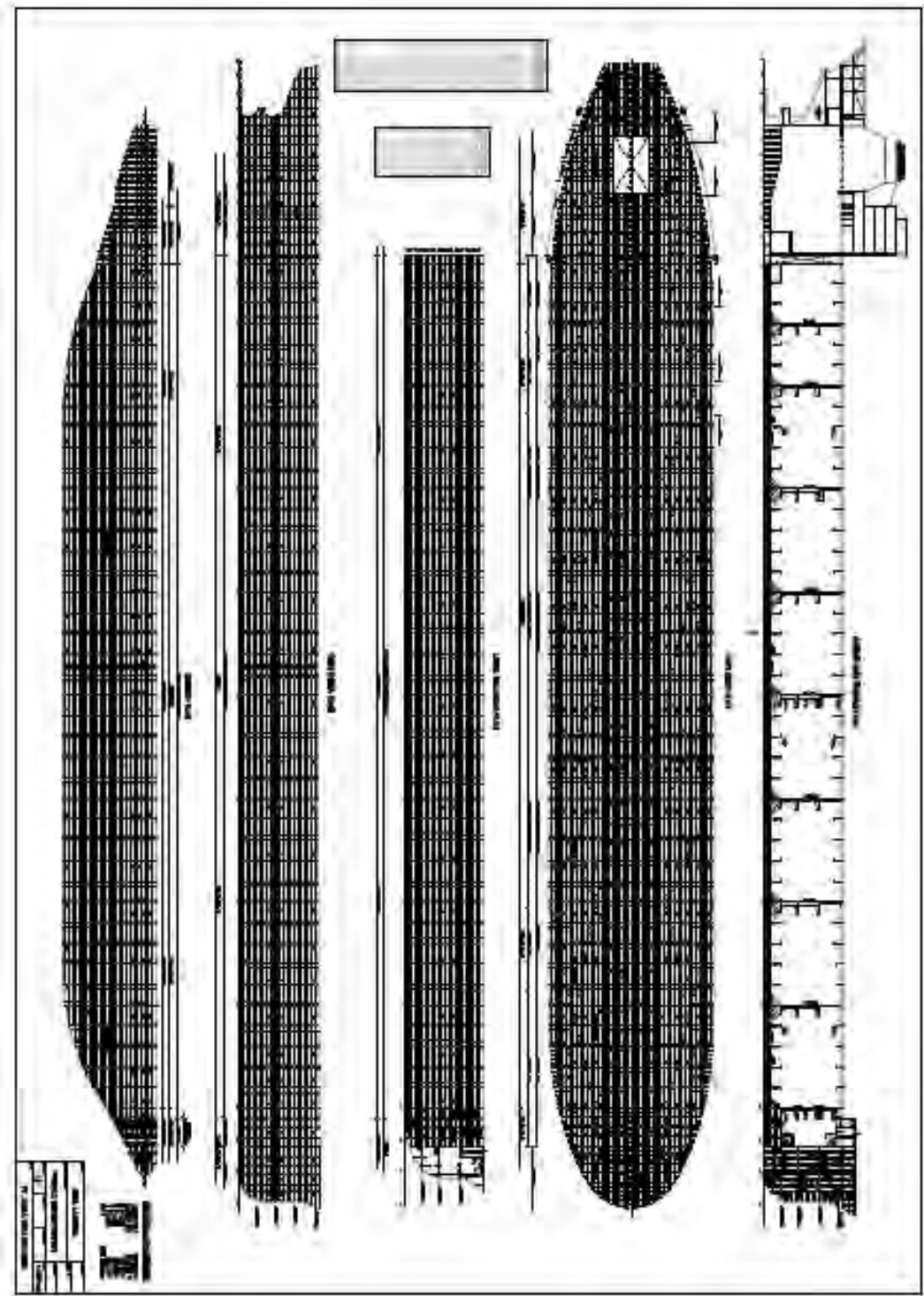
- ABS, 2001, '*Safehull-Dynamic Loading Approach*' for Floating Production, Storage and Offloading (FPSO) Installations, USA: American Bureau of Shipping ABS Plaza.
- ABS, 2001, '*Shipbuilding and Repair Quality Standard for Hull Structures during Construction*', USA: American Bureau of Shipping ABS Plaza.
- ABS, 2004, *Guide for Building and Classing Floating Production Installations*, USA: American Bureau of Shipping. C. J. Kaufman, Rocky Mountain Research Lab., Boulder, CO, komunikasi pribadi, (1995, May).
- API RP 2SK. (1996). *Recommended Practice for Design and Analysis of Station Keeping Systems for Floating Structures*. Washington. DC
- API RP 2P. (2001). *Recommended Practice for Design and Analysis of Station Keeping Systems for Floating Structures*. Washington. DC
- API RP2SK 3<sub>rd</sub> edition. (2005). *Recommended Practice for Design and Analysis of Station Keeping Systems for Floating Structures*. Washington. DC
- Bhattacharyya. R., 1978, *Dynamics of Marine Vehicles*, New York: John Wiley & Sons Inc.
- Chakrabarti, S.K., 1987, *Hydrodynamics of Offshore Structures*, USA: Computational Mechanics Publications Southampton.
- Djarmiko, E. B, 2012, *Perilaku dan Operabilitas Bangunan Laut di Atas Gelombang Acak*, its press, Surabaya.
- Djarmiko, E. B. and Murdijanto, 2003, *Seakeeping: Perilaku Bangunan Apung di atas Gelombang*, Jurusan Teknik Kelautan, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya, Indonesia.
- DNV (2010), *Environmental Conditions and Environmental Loads*, Det Norske Veritas, Norway
- DNV-OSS-102, 2003, *Rules for Classification of Floating Production and Storage Units*, Norway: Det Norske Veritas.
- DNV OS E301, 2004, "*Position Mooring*", Det Norske Veritas, Norway.
- DNV RP C205, 2010, "*Environmental Conditions and Environmental Loads*", Det Norske Veritas, Norway.

- Murtedjo, Mas., 1999, *Handout Teori Bangunan Apung*, Surabaya: ITS.
- Sabana, Norman Mahdar., 2012, *Analisis Tegangan pada Yoke Arm External Turret Mooring System Floating Production Storage and Offloading (FPSO)*, Tugas Akhir Jurusan Teknik Kelautan, ITS, Surabaya.
- Oil Companies International Marine Forum, 2009, *Tandem Mooring & Offloading Guidelines for Conventional Tankers at F(P)SO Facilities*, United Kingdom: Oil Companies International Marine Forum.
- Popov, E. P., 1996, *Mekanika Teknik*, Jakarta: Erlangga.
- Soedjono, J.J., 1999. "Diktat mata kuliah Konstruksi Bangunan Laut II", Jurusan Teknik Kelautan, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya, Indonesia.
- Suryanto. AKS (2009) "Study Selection Configuration Multi Buoy Mooring Due Extrem Condition Based On Reliability". *Scientific Publications Search Engine*. ITS Surabaya
- Wischer J. E. W. and Van Sluys M. F. *The influence of waves on the low-frequency hydrodynamic coefficients of moored vessels*. OTC 3225. 1979.

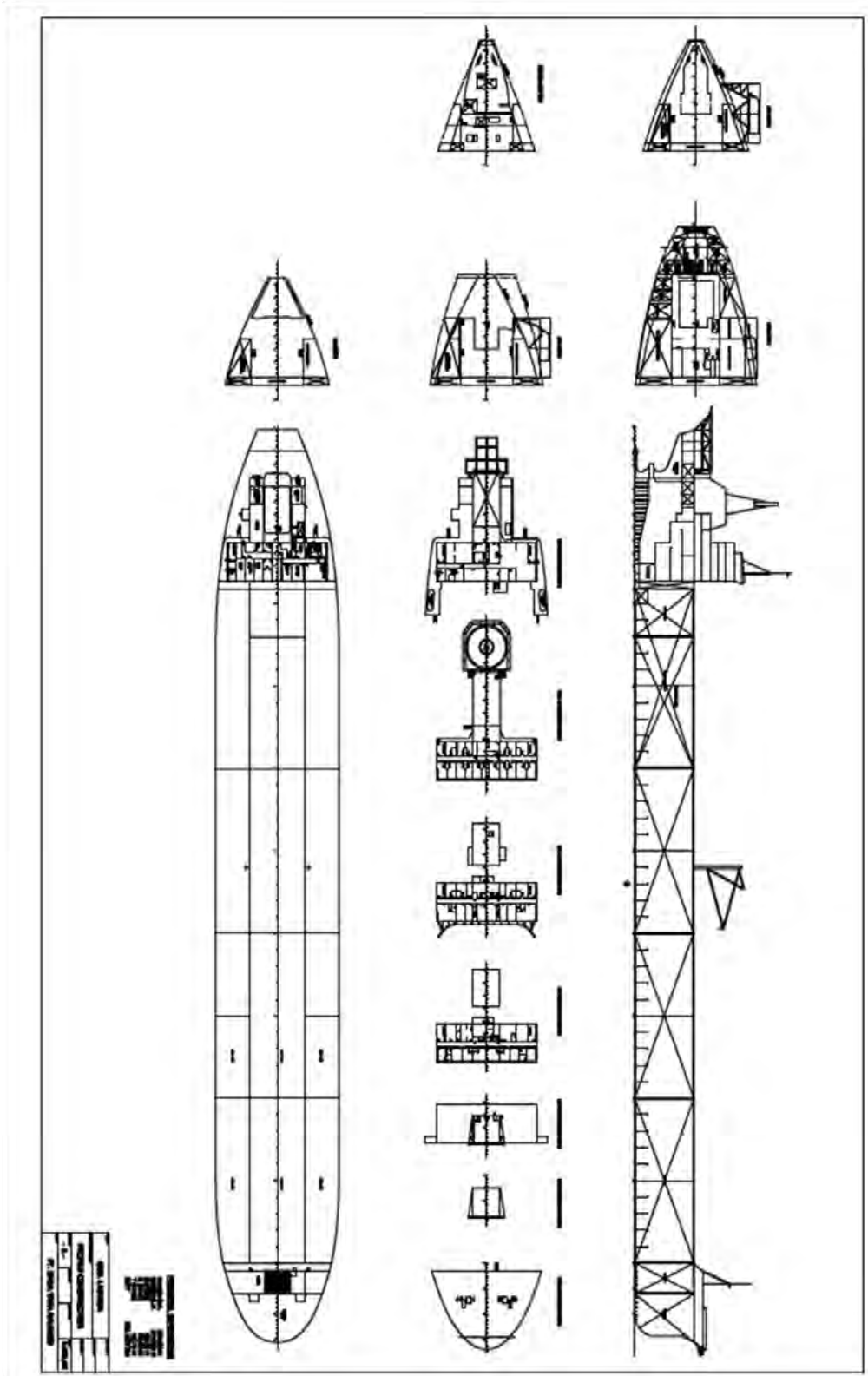
**LAMPIRAN A**  
**DATA DAN MODEL STRUKTUR**  
**FSO Ladinda**

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

*CONSTRUCTION PROFILE FSO Ladinda*

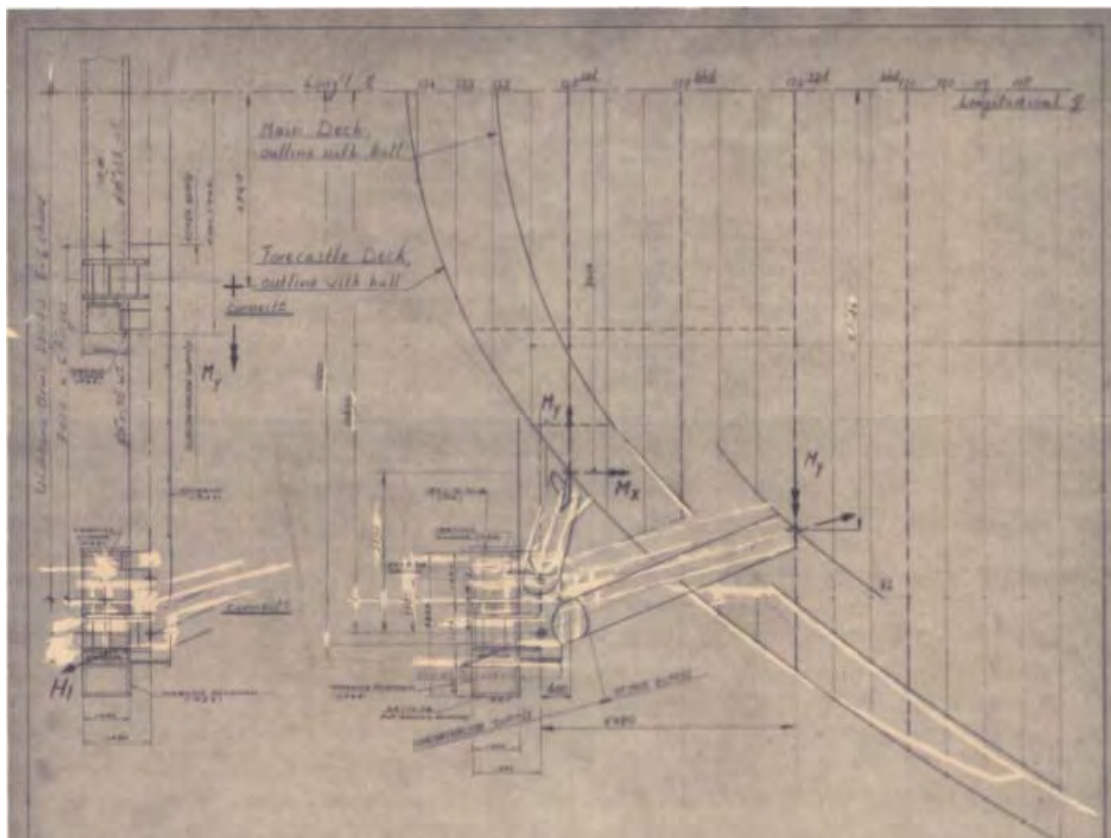


**GANERAL ARRANGEMENT FSO Ladinda**

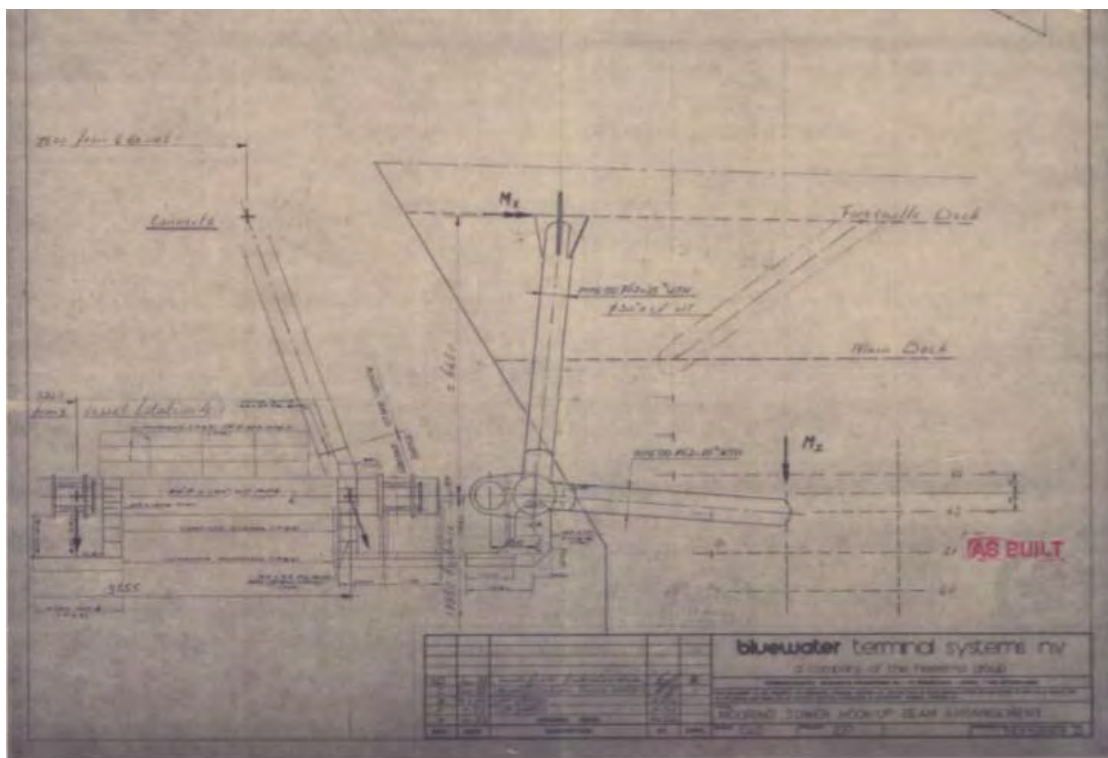




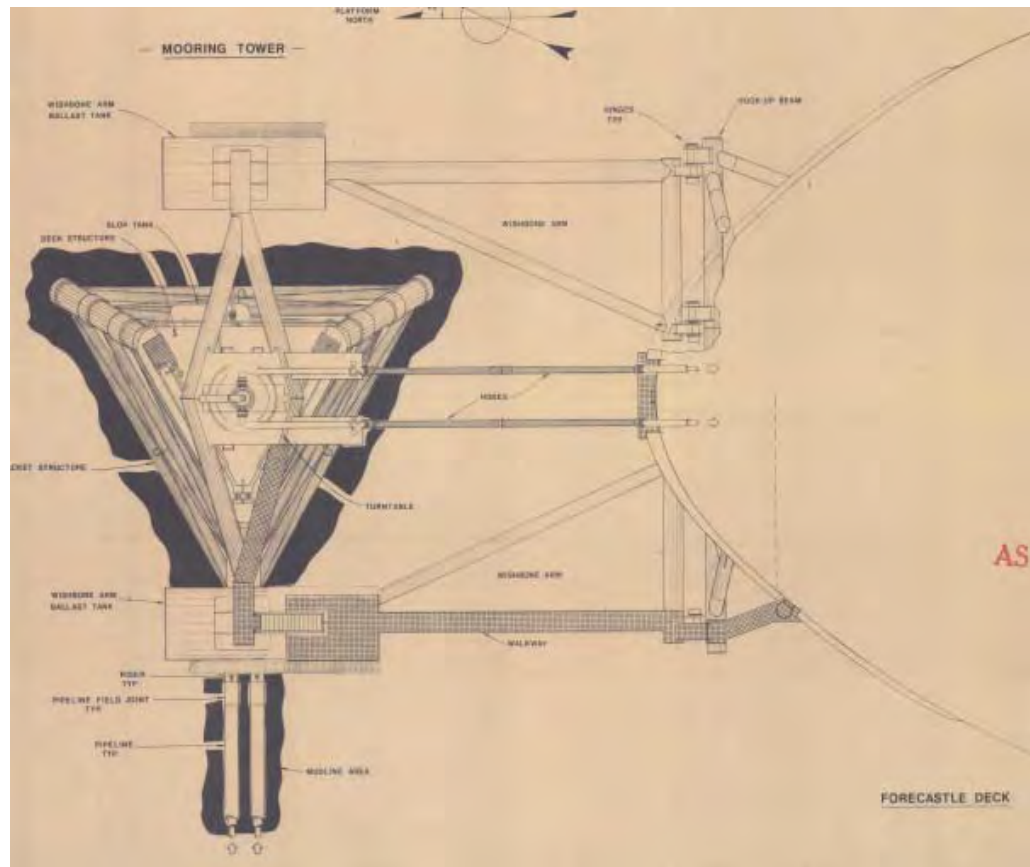
*Sambungan Yoke Arm dengan Hull Kapal tampak atas*



*Sambungan Yoke Arm dengan Hull Kapal tampak samping*

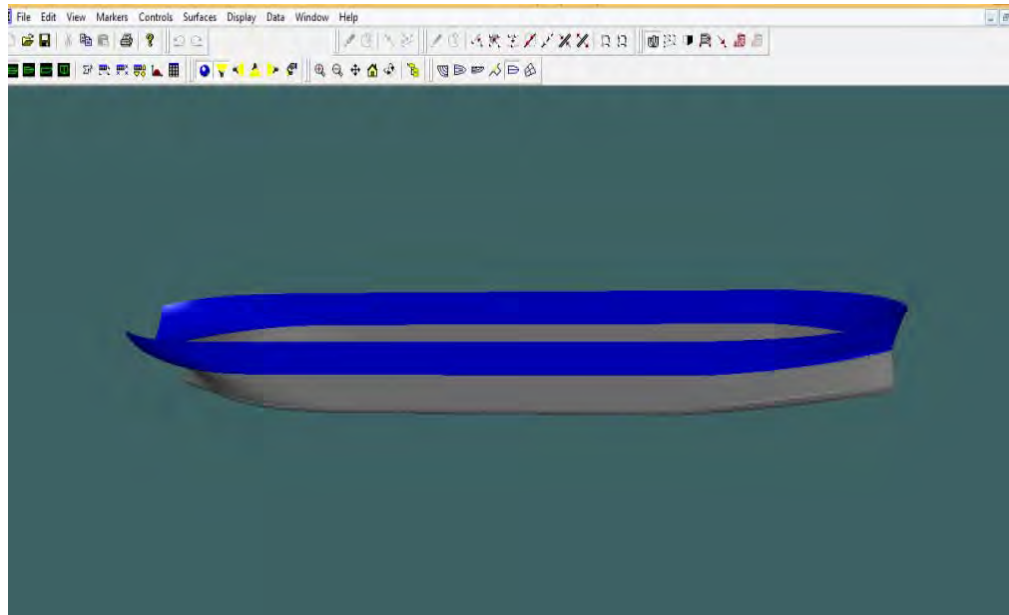


*Sambungan Yoke Arm tampak atas keseluruhan*

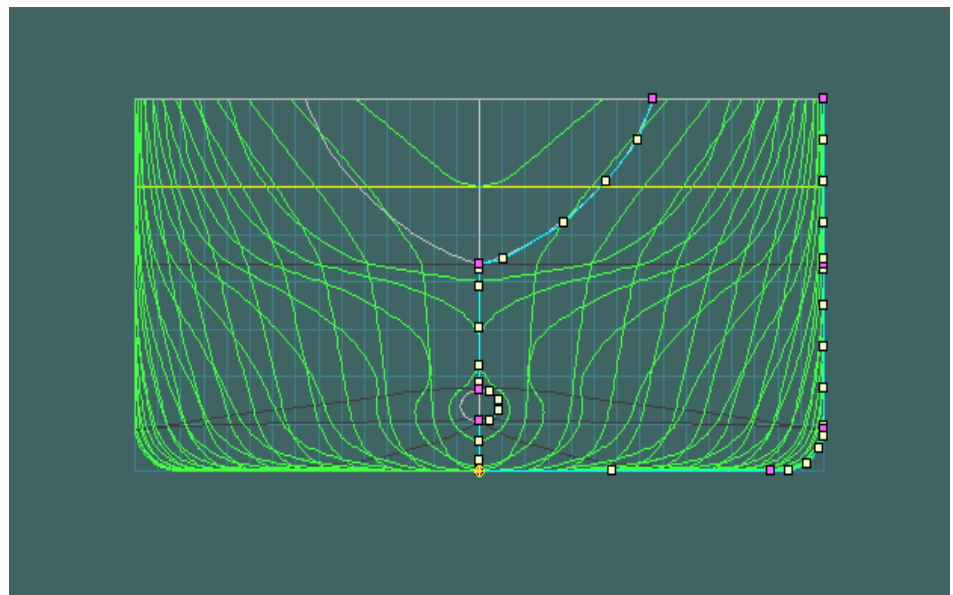


## *Pemodelan FSO Ladinda dengan software Maxsurf*

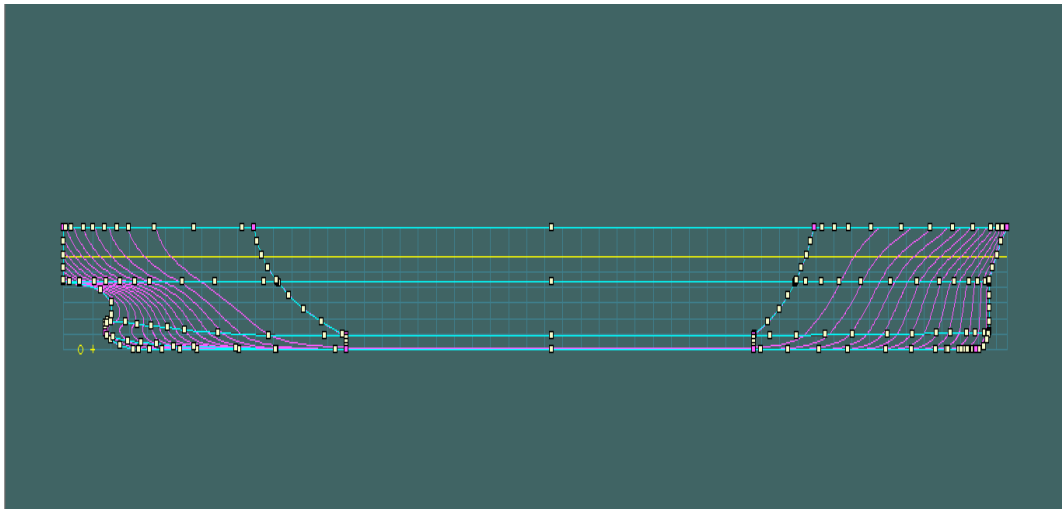
### *a) Model tampak perspective*



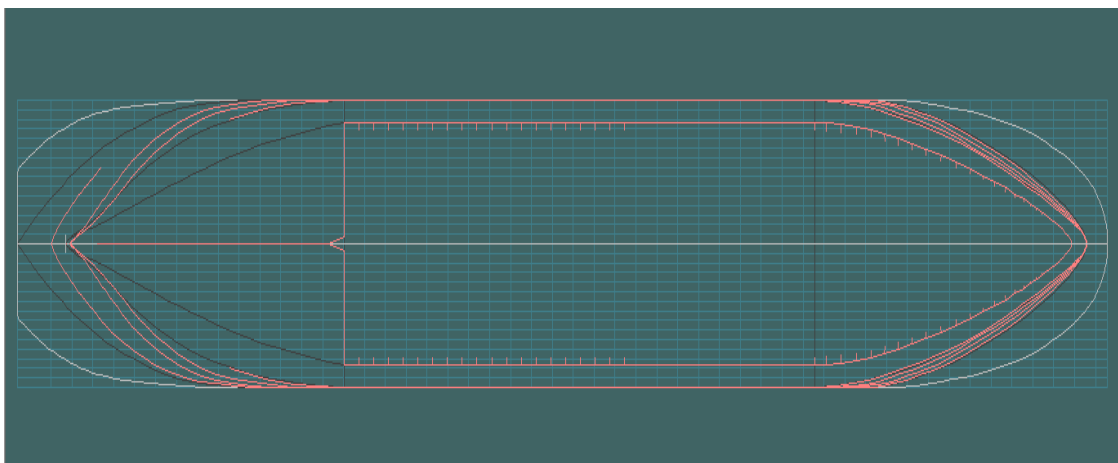
### *b) Model tampak depan (Body Plan)*



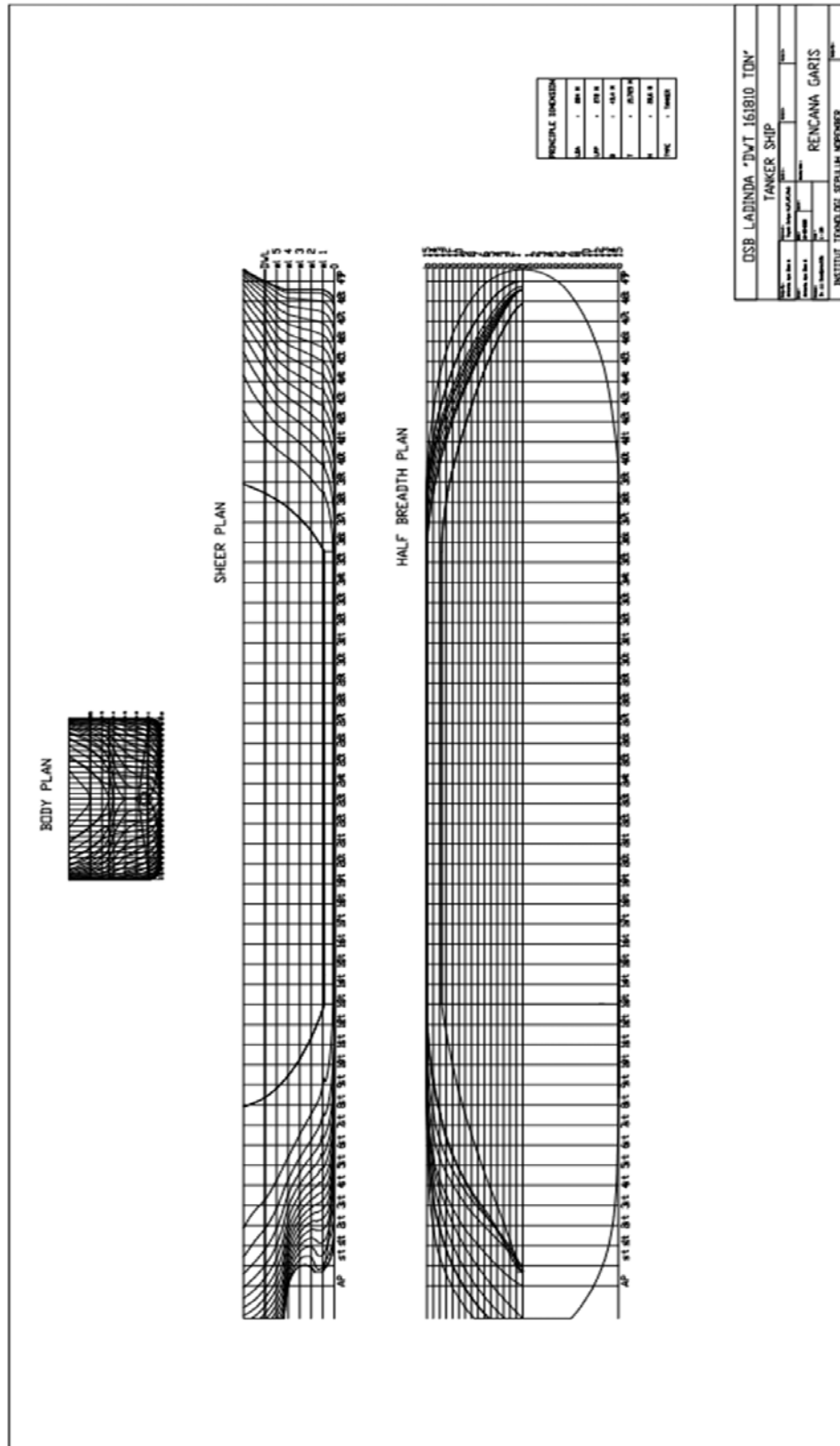
c) *Model tampak samping (Sheer Plan)*



d) *Model tampak atas (Breadth Plan)*

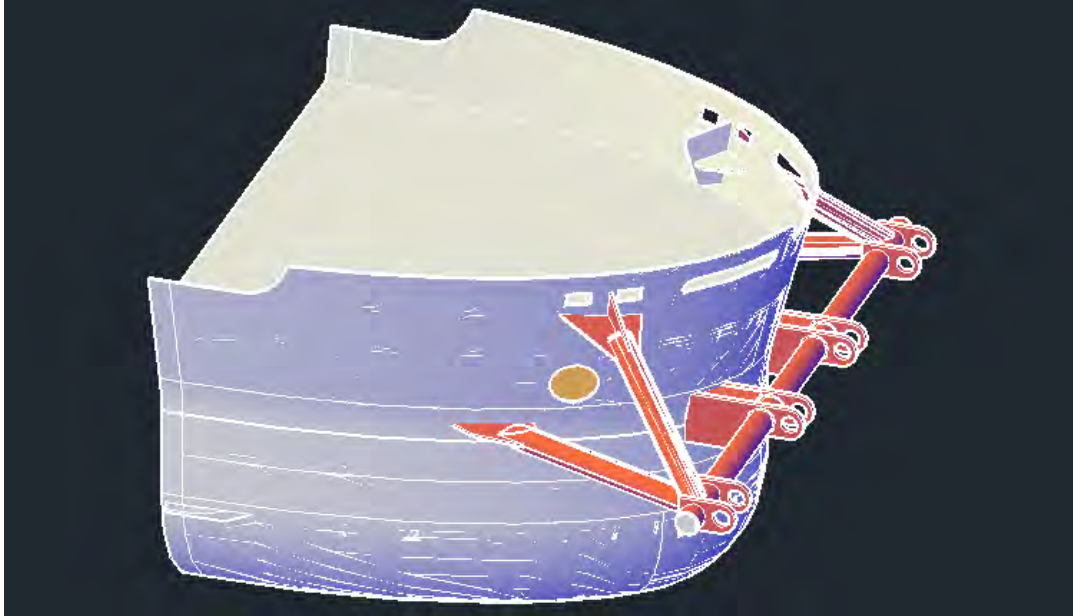


### *Lines Plan FSO Ladinda*

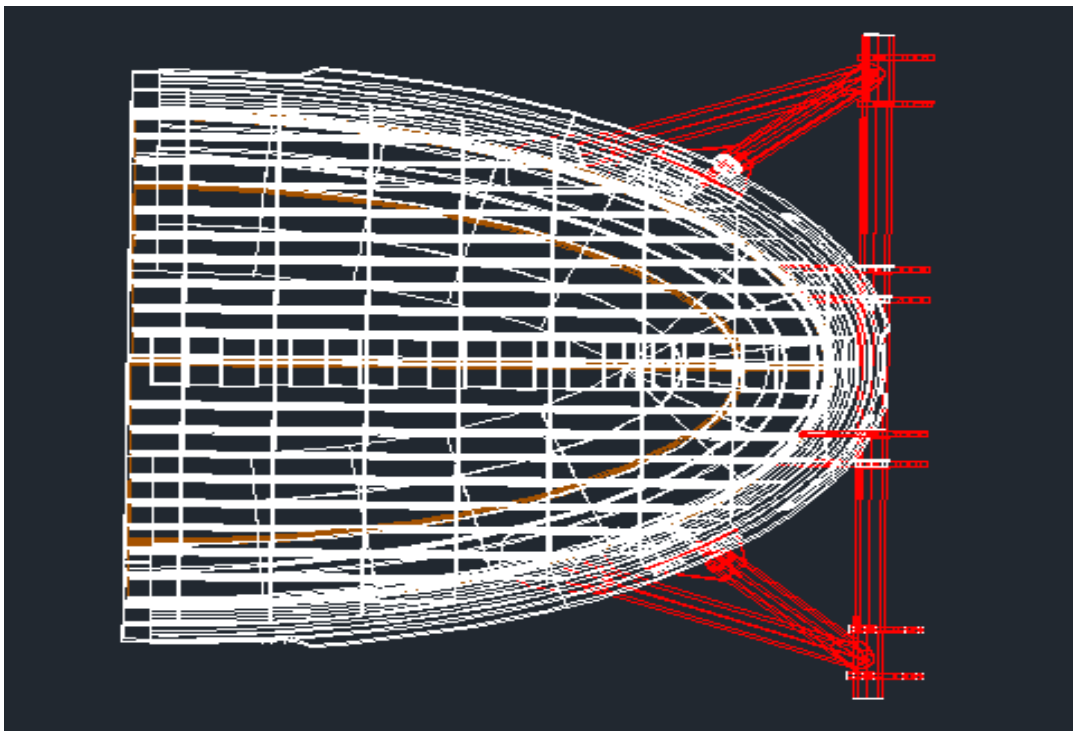


## MODEL KONSTRUKSI FSO DENGAN SAMBUNGAN YOKE ARM DENGAN AUTOCAD3D

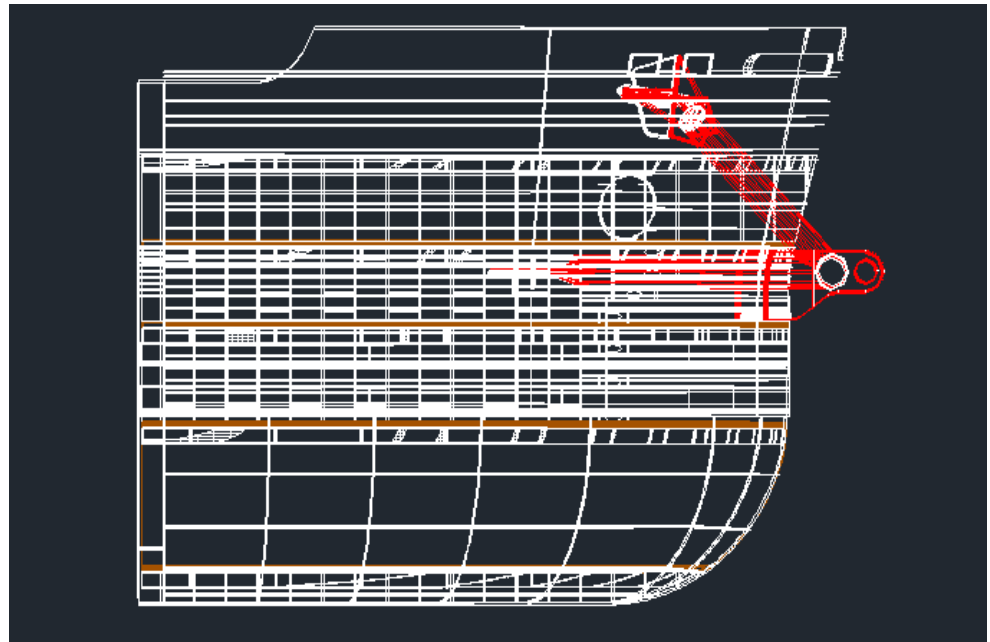
a) Tampak Isometri



b) Tampak Atas



**c) Tampak Samping**





(Halaman ini sengaja dikosongkan)

**LAMPIRAN B**

**PERHITUNGAN RESPON**

**SPEKTRA DAN GRAFIK**

**RESPON SPEKTRA**

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

## Analisis Spektra Gelombang

Pemilihan spektrum gelombang untuk menganalisa respon dari pada gerakan struktur pada gombang acak (irregular) adalah berdasarkan dari kondisi laut sebenarnya yang akan dianalisis. Dari beberapa jenis spektrum gelombang yang akan digunakan dalam penelitian ini adalah Spektrum JONSWAP. Pemilihan jenis spektrum JONSWAP ini didasarkan pada penentuan yang telah terdapat di Chakrabarti (1987) yang telah dibahas pada BAB II. Selain itu, pada DNV RP C205 juga dijelaskan bahwa spektrum JONSWAP diaplikasikan pada perairan dengan :  $T_p / (H_s)^{1/2} \leq 3.6$  ,  $\gamma = 5$

Untuk perairan Selat Malaka, nilai  $T_p / (H_s)^{1/2} = 5 / (1.9)^{1/2} = 3.63$   
Karena hasilnya lebih dari persyaratan maka memperoleh nilai  $\gamma$ nya

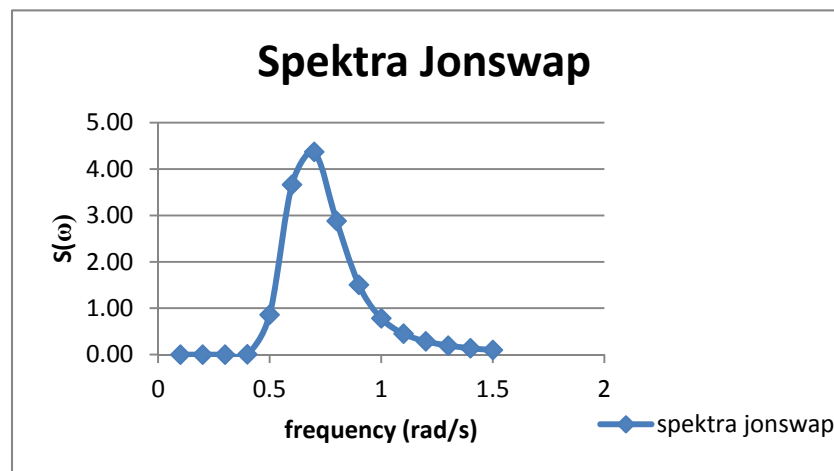
menggunakan persamaan sebagai berikut:

$$\gamma = \exp(5.75 - 1.15 T_p / (H_s)^{1/2})$$

Sehingga:

$$\gamma = \exp(5.75 - 1.15 \times 5 / (1.9)^{1/2}) = 2.29$$

Berikut adalah grafik spektrum gelombang untuk perairan Selat Malaka tempat FSO beroperasi terdapat pada **Gambar 4.42**:



**Gambar 4.42** Spektrum Jonswap Perairan Selat Malaka dengan  $H_s = 1.98$  m

Pada analisis akan ditentukan respon struktur dari FSO sebagai respon kerapatan energi pada struktur akibat gelombang. Spektra respons didapatkan dengan cara mengkalikan harga spektra gelombang dengan RAO kuadrat. Maka grafik respon struktur pada enam derajat kebebasan yang dihasilkan adalah sebagai berikut :

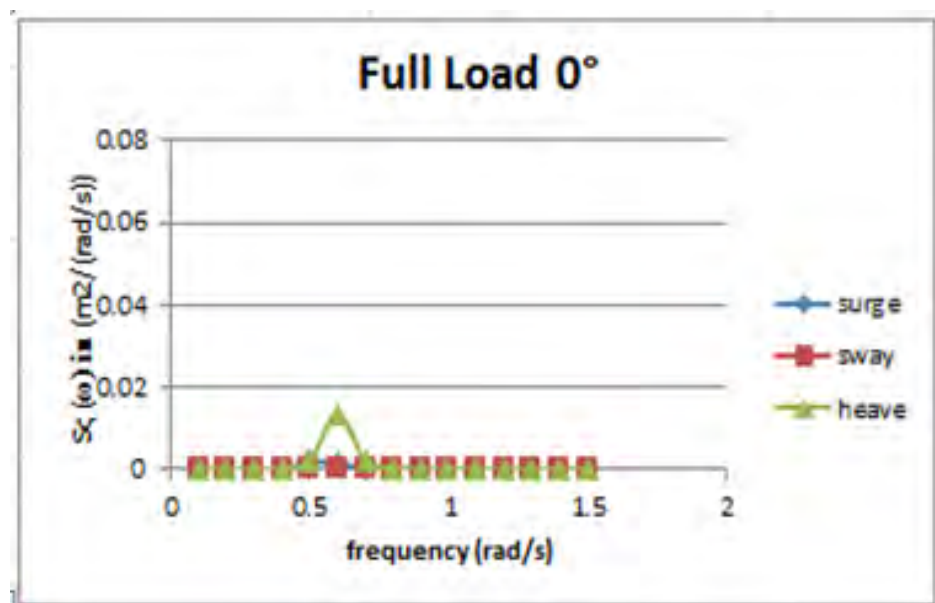
$$RAO^2 \times S(\omega) = S_r(\omega)$$

**Gambar 4.43** Langkah perhitungan mencari respon spektra

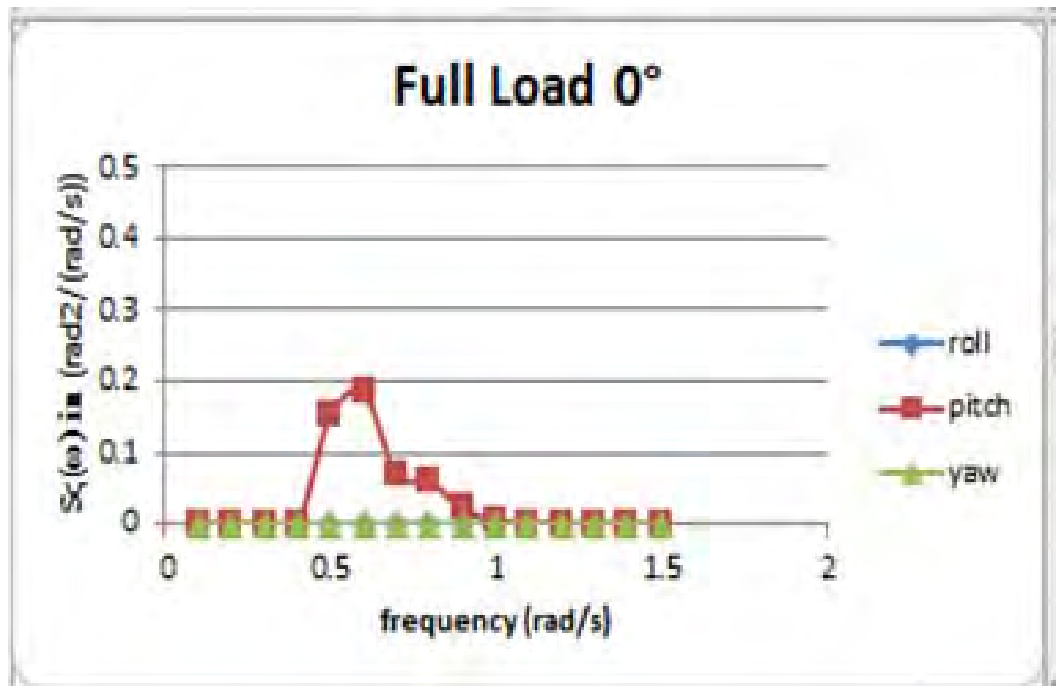
Sama halnya dengan penjelasan analisis perilaku gerak di gelombang regular (RAO) pada bahasan sebelumnya, penjelasan hasil analisis perilaku gerak di gelombang acak juga akan dijabarkan sesuai dengan kondisi muatan yang ditinjau. Berikut adalah penjelasannya secara lebih lengkap.

#### 4.7.1 Analisi Perilaku Gerakan FSO Pada Gelombang Acak Kondisi Terapung Bebas (Free Floating)

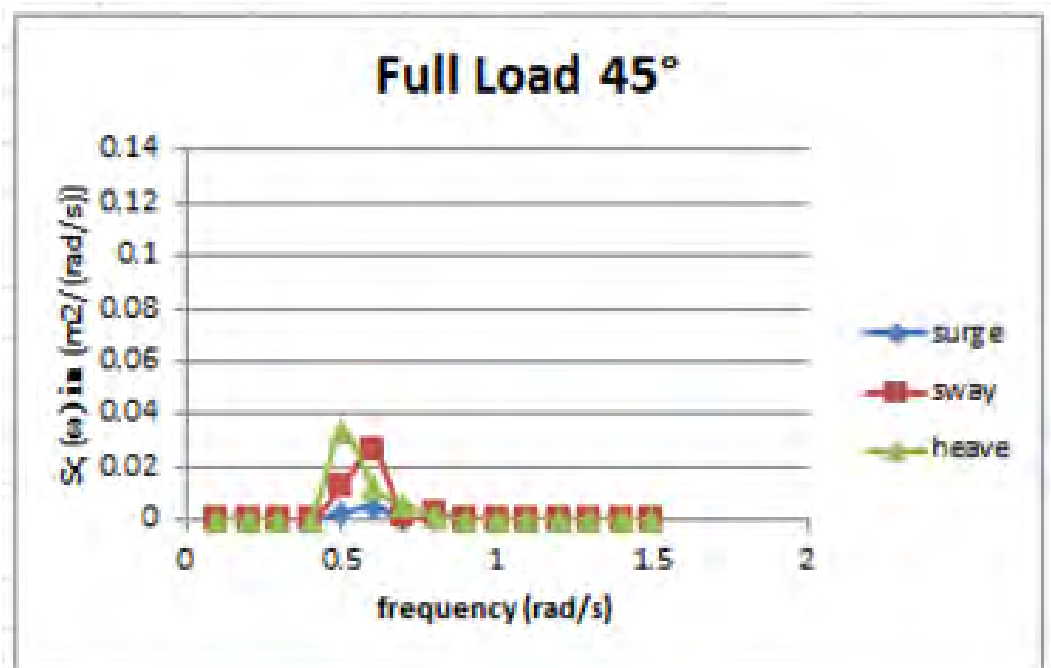
- Analisis Respon Gerak FSO Muatan Penuh (*Full Load*)



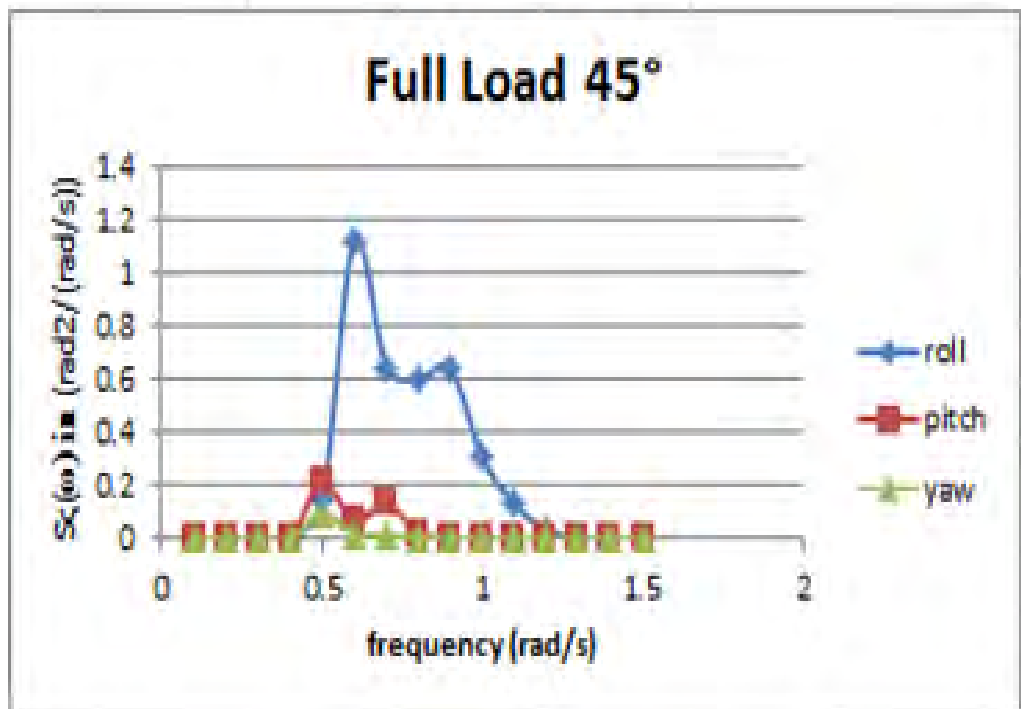
**Gambar 4.43** Grafik respon spektra gerakan translasi pada FSO Ladinda saat kondisi *full load* terapung bebas dengan *heading* pembebanan 0 derajat



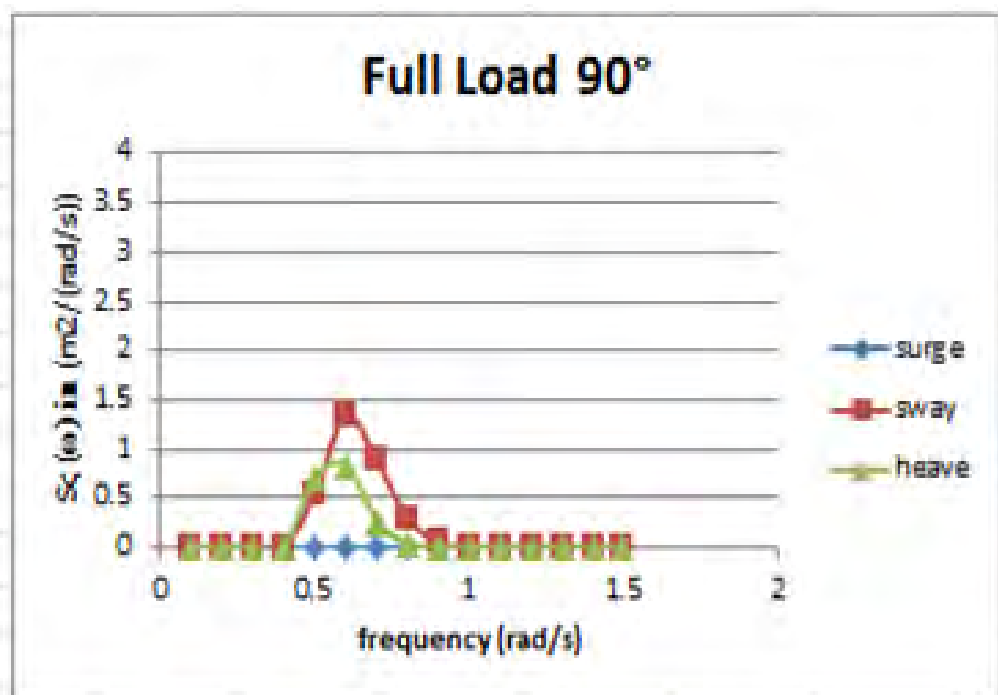
**Gambar 4.44** Grafik respon spektra gerakan rotasi pada FSO Ladinda saat kondisi *full load* terapung bebas dengan *heading* pembebanan 0 derajat



**Gambar 4.45** Grafik respon spektra gerakan translasi pada FSO Ladinda saat kondisi *full load* terapung bebas dengan *heading* pembebanan 45 derajat

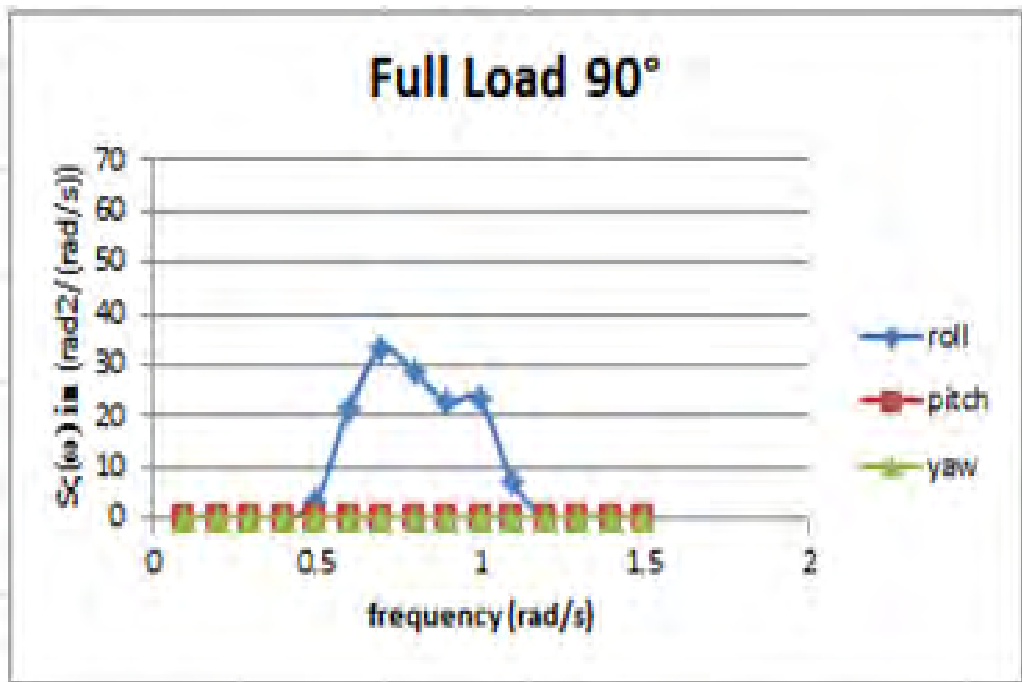


**Gambar 4.46** Grafik respon spektra gerakan rotasi pada FSO Ladinda saat kondisi *full load* terapung bebas dengan *heading* pembebanan 45 derajat

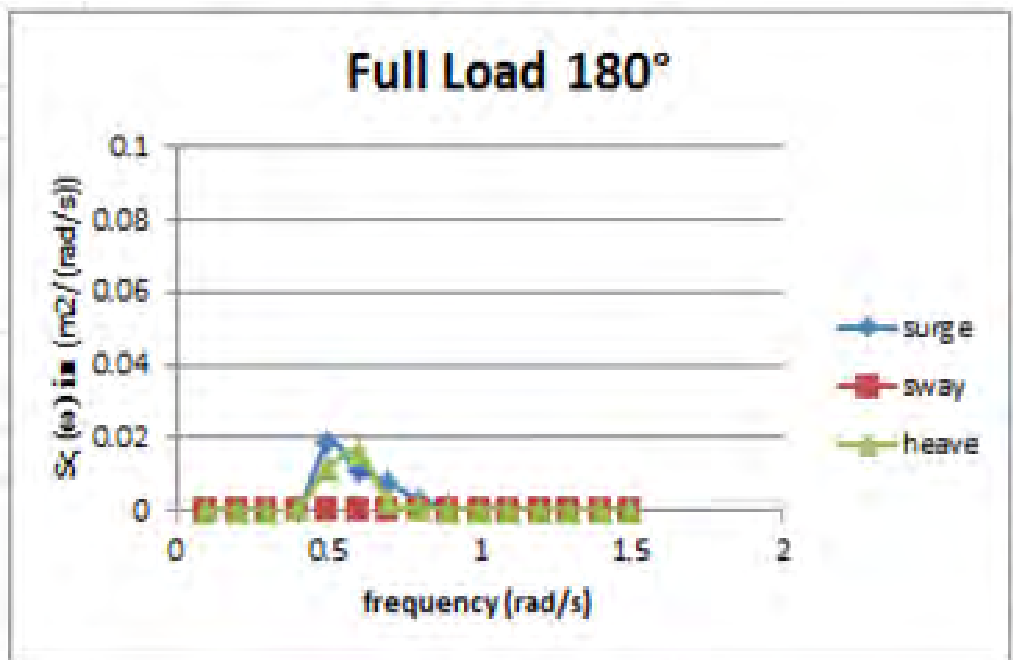


**Gambar 4.47** Grafik respon spektra gerakan translasi pada FSO Ladinda saat kondisi *full load* terapung bebas dengan *heading* pembebanan 90 derajat

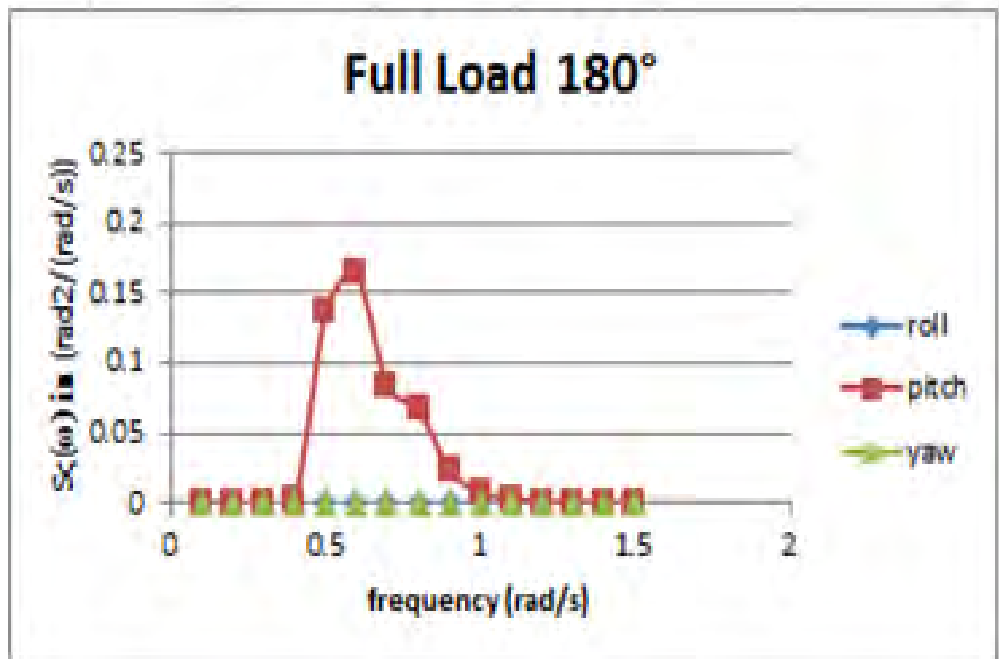




**Gambar 4.48** Grafik respon spektra gerakan rotasi pada FSO Ladinda saat kondisi *full load* terapung bebas dengan *heading* pembebanan 90 derajat

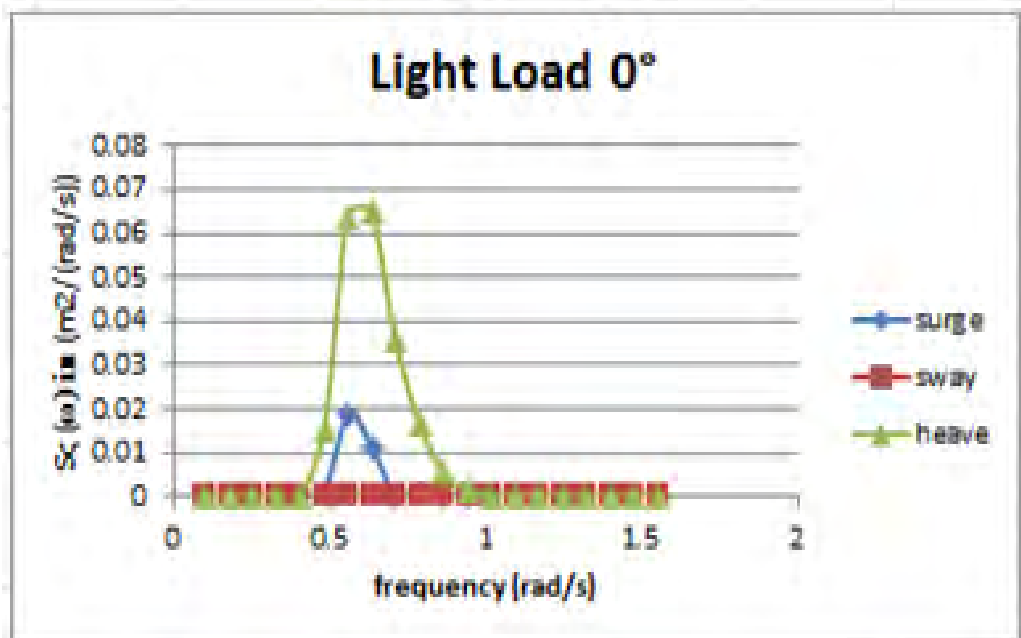


**Gambar 4.49** Grafik respon spektra gerakan translasi pada FSO Ladinda saat kondisi *full load* terapung bebas dengan *heading* pembebanan 180 derajat

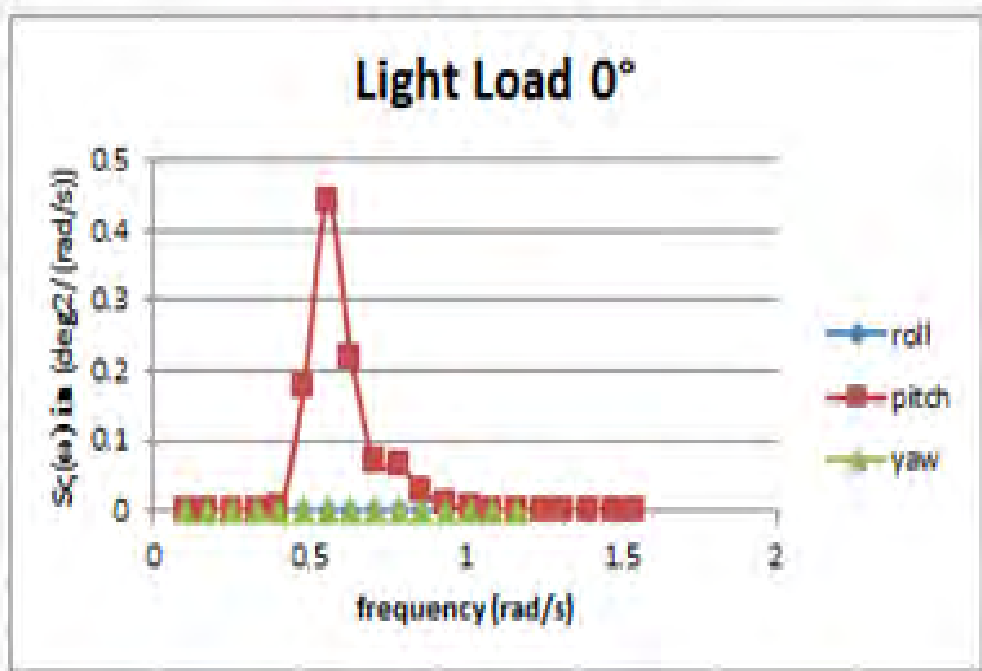


**Gambar 4.50** Grafik respon spektra gerakan rotasi pada FSO Ladinda saat kondisi *full load* terapung bebas dengan *heading* pembebanan 180 derajat

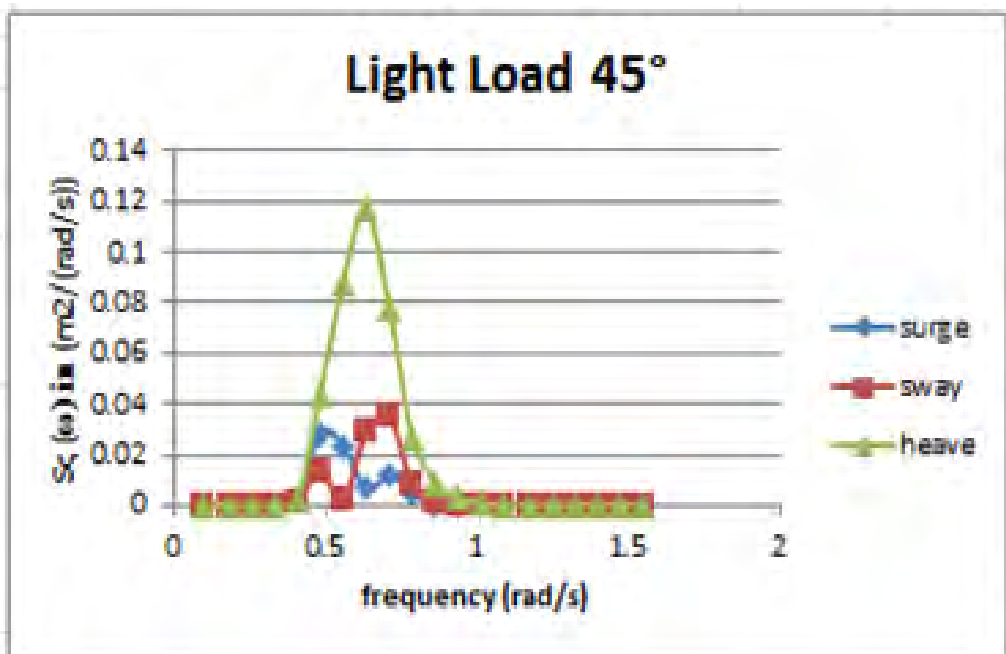
➤ Analisis Respon Gerak FSO Muatan Kosong (*Light Load*)



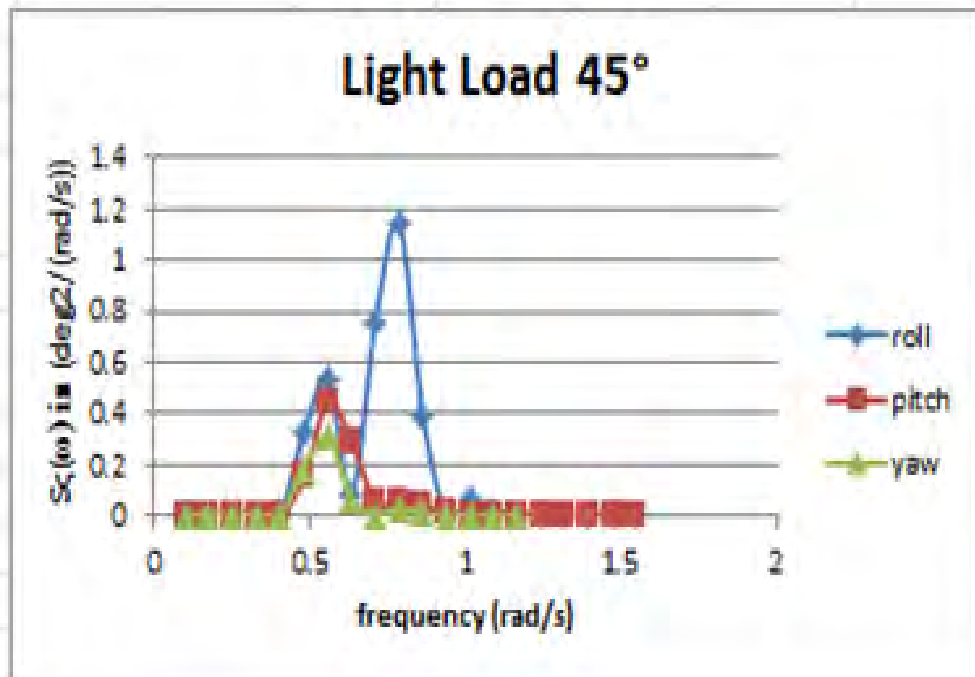
**Gambar 4.51** Grafik respon spektra gerakan translasi pada FSO Ladinda saat kondisi *light load* terapung bebas dengan *heading* pembebanan 0 derajat



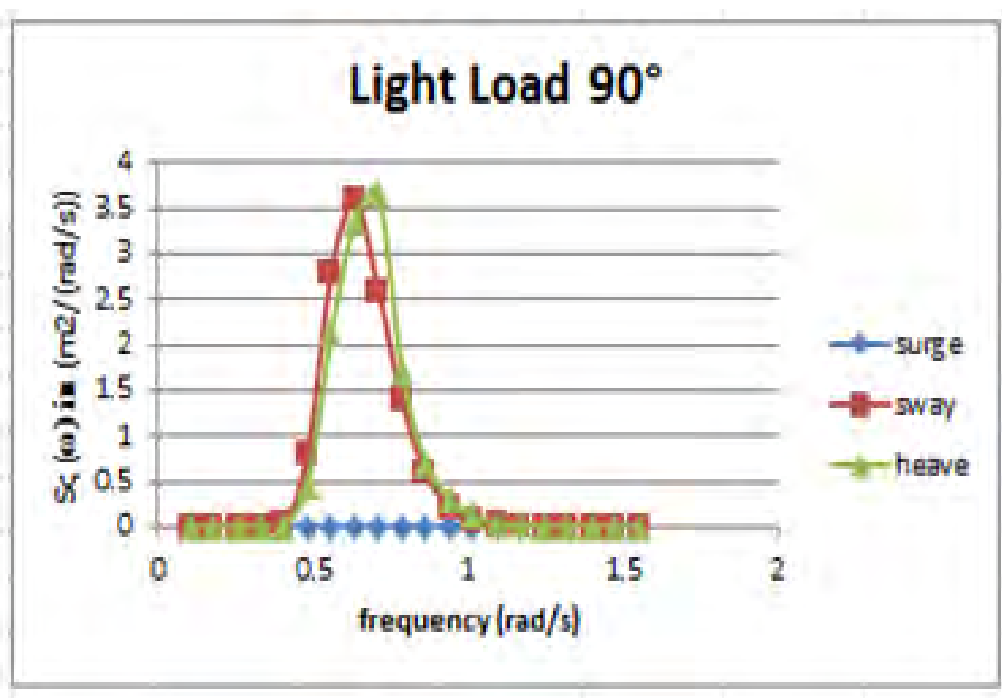
**Gambar 4.52** Grafik respon spektra gerakan rotasi pada FSO Ladinda saat kondisi *light load* terapung bebas dengan *heading* pembebanan 0 derajat



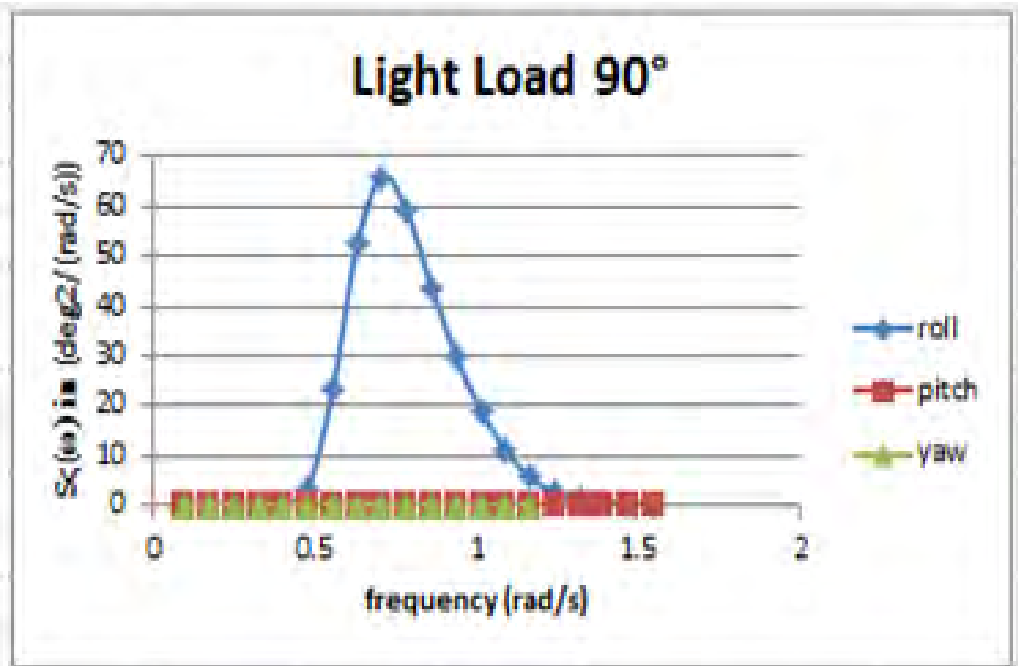
**Gambar 4.53** Grafik respon spektra gerakan translasi pada FSO Ladinda saat kondisi *light load* terapung bebas dengan *heading* pembebanan 0 derajat



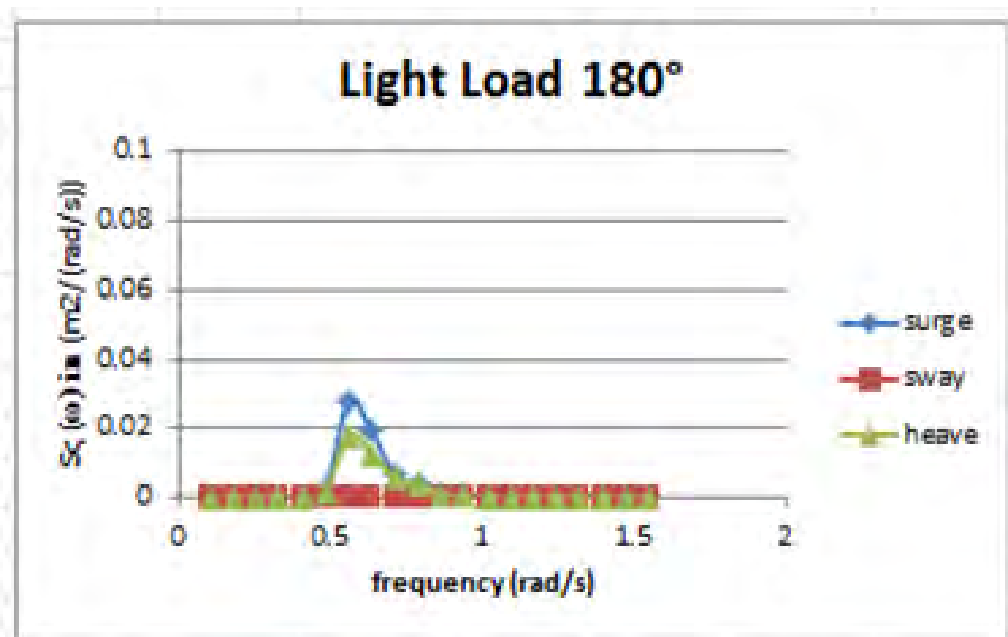
**Gambar 4.54** Grafik respon spektra gerakan translasi pada FSO Ladinda saat kondisi *light load* terapung bebas dengan *heading* pembebanan 0 derajat



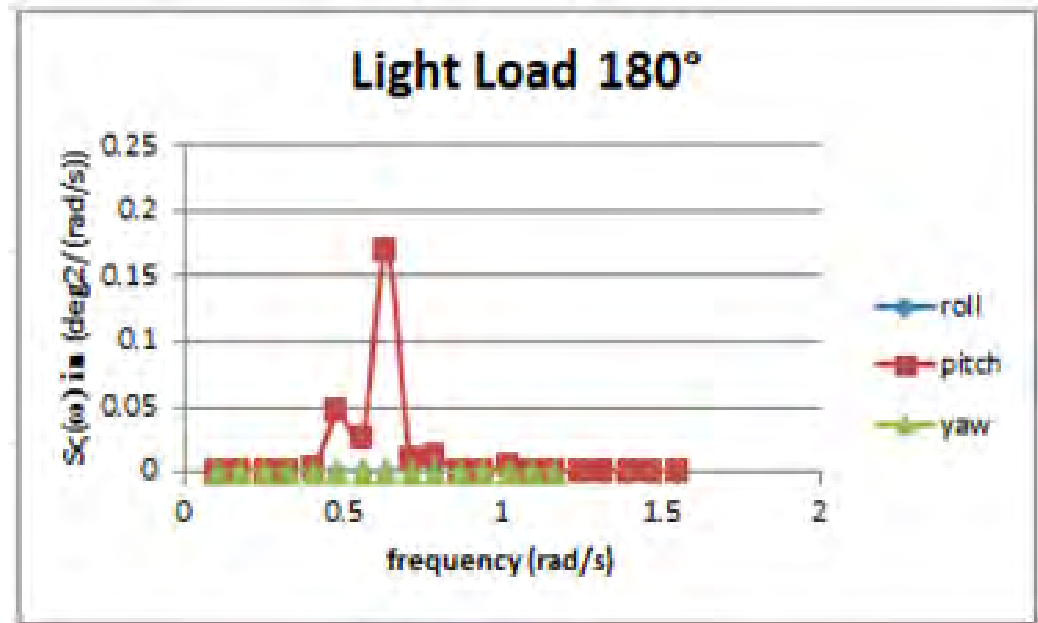
**Gambar 4.55** Grafik respon spektra gerakan translasi pada FSO Ladinda saat kondisi *light load* terapung bebas dengan *heading* pembebanan 0 derajat



**Gambar 4.56** Grafik respon spektra gerakan rotasi pada FSO Ladinda saat kondisi *light load* terapung bebas dengan *heading* pembebanan 90 derajat



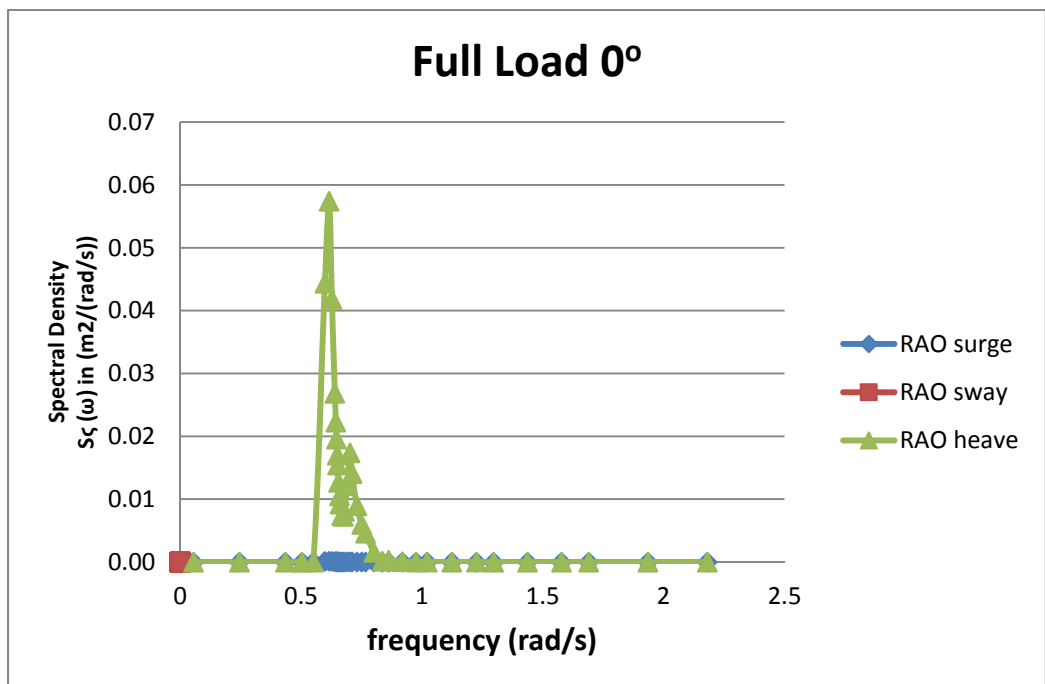
**Gambar 4.57** Grafik respon spektra gerakan translasi pada FSO Ladinda saat kondisi *light load* terapung bebas dengan *heading* pembebanan 180 derajat



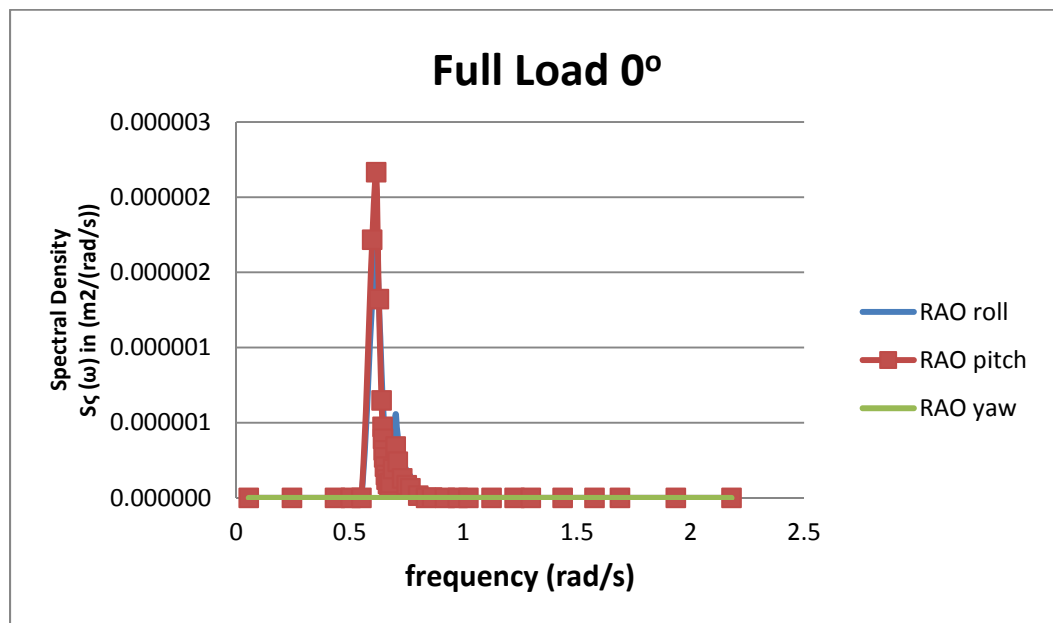
**Gambar 4.58** Grafik respon spektra gerakan rotasi pada FSO Ladinda saat kondisi *light load* terapung bebas dengan *heading* pembebanan 180 derajat

#### 4.7.2 Analisa Perilaku Gerakan FSO Pada Gelombang Acak Kondisi Tertambat (Moored)

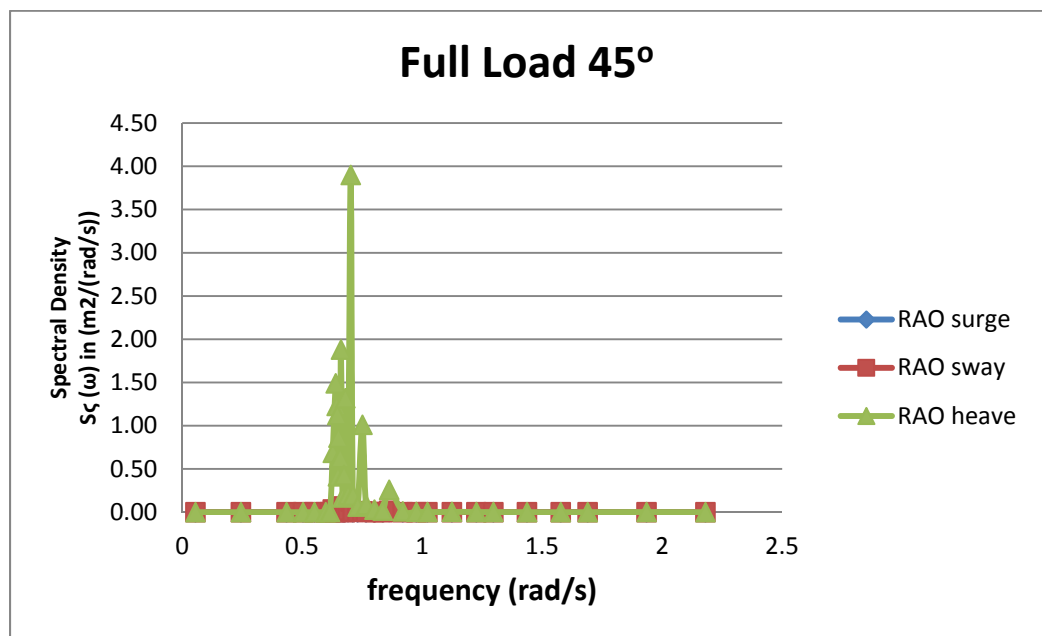
- Analisa Perilaku FSO dengan muatan penuh (*Full Load Condition*)



**Gambar 4.59** Grafik respon spektra gerakan translasi pada FSO Ladinda saat kondisi *full load* tertambat dengan *heading* pembebanan 0 derajat

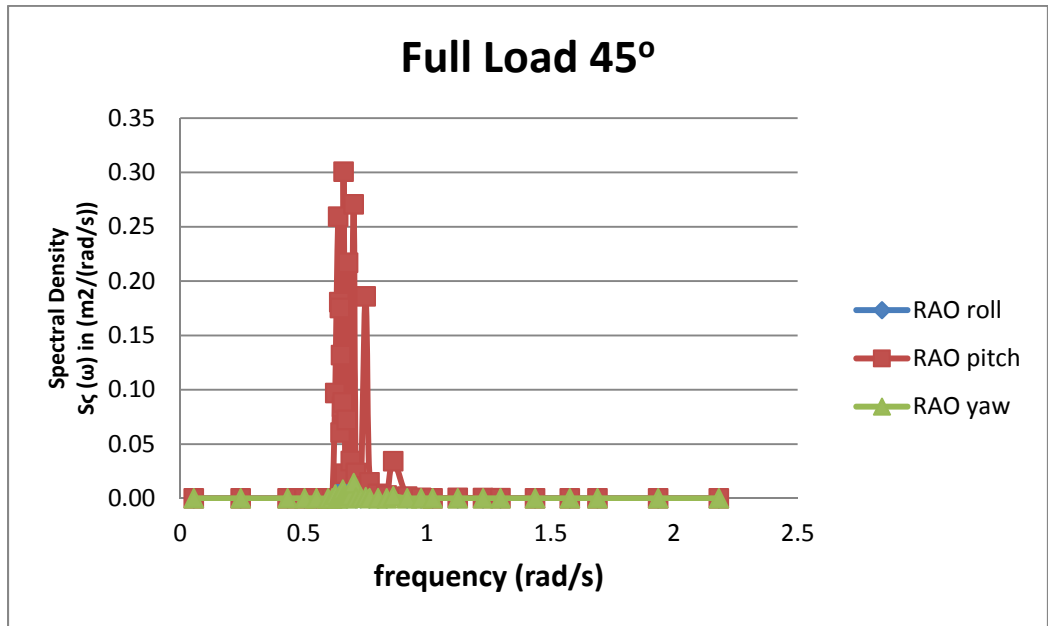


**Gambar 4.60** Grafik respon spektra gerakan rotasi pada FSO Ladinda saat kondisi *full load* tertambat dengan *heading* pembebanan 0 derajat

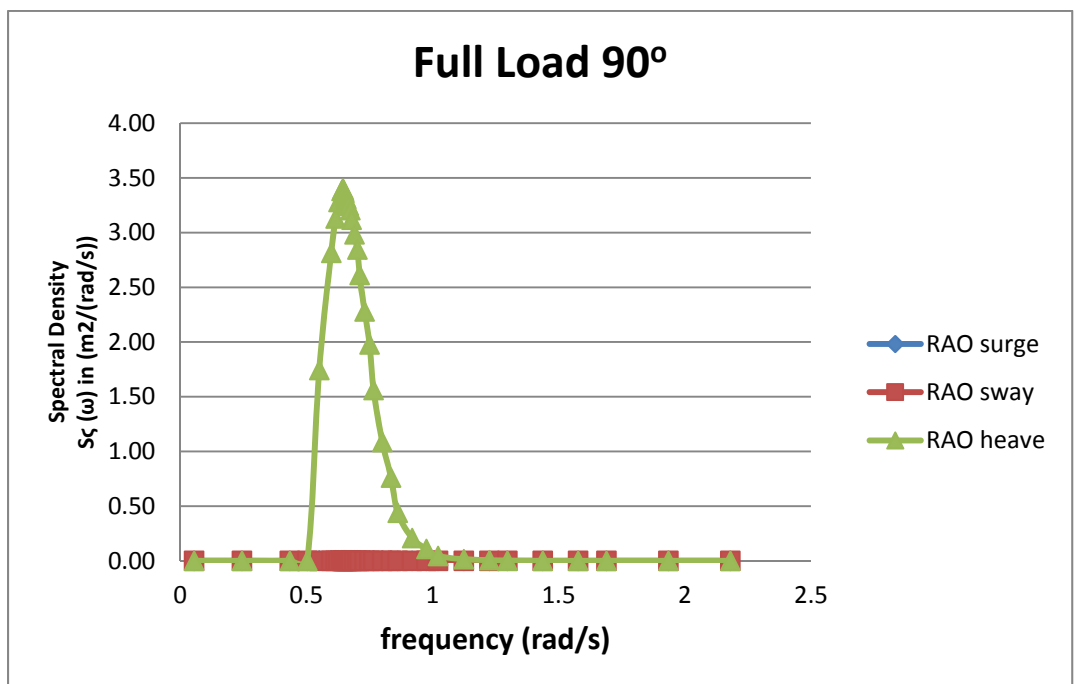


**Gambar 4.61** Grafik respon spektra gerakan translasi pada FSO Ladinda saat kondisi *full load* tertambat dengan *heading* pembebanan 45 derajat

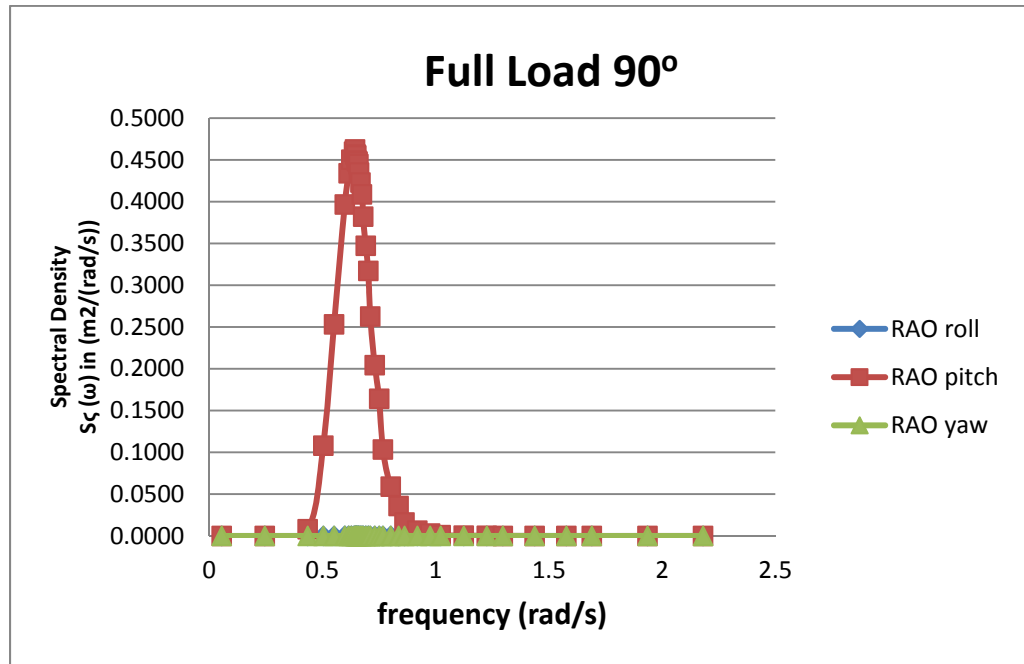




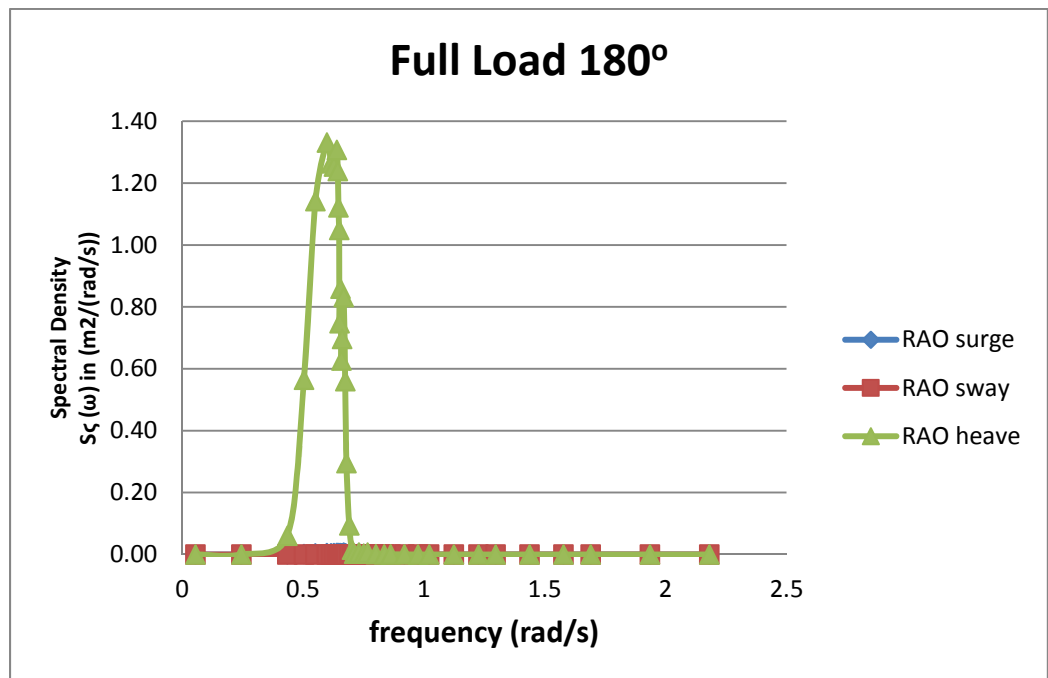
**Gambar 4.62** Grafik respon spektra gerakan translasi pada FSO Ladinda saat kondisi *full load* tertambat dengan *heading* pembebanan 0 derajat



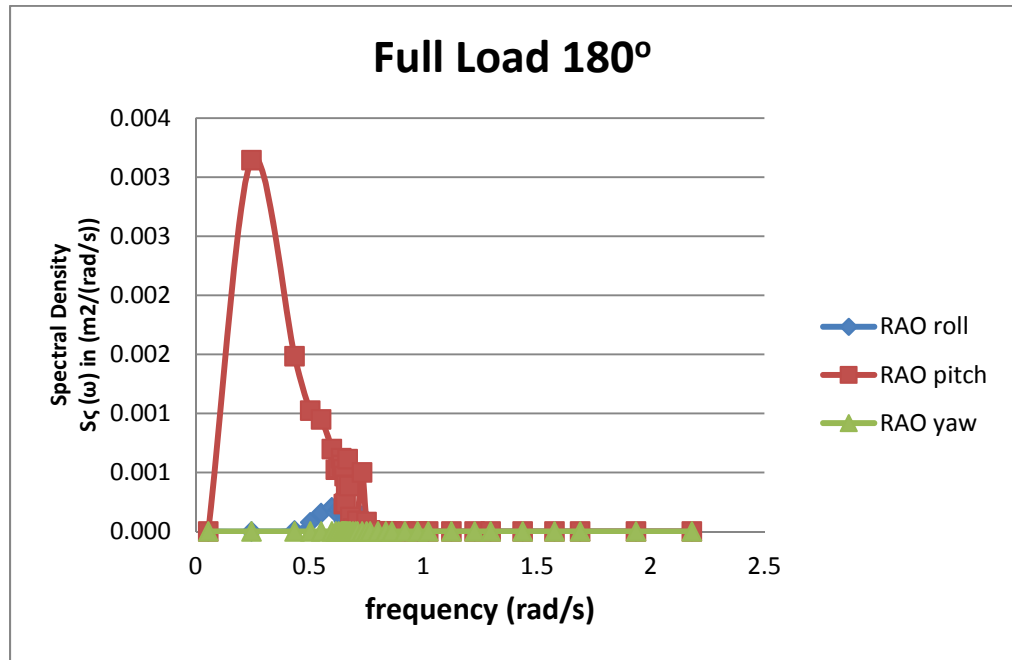
**Gambar 4.63** Grafik respon spektra gerakan translasi pada FSO Ladinda saat kondisi *full load* tertambat dengan *heading* pembebanan 0 derajat



**Gambar 4.64** Grafik respon spektra gerakan translasi pada FSO Ladinda saat kondisi *full load* tertambat dengan *heading* pembebanan 0 derajat

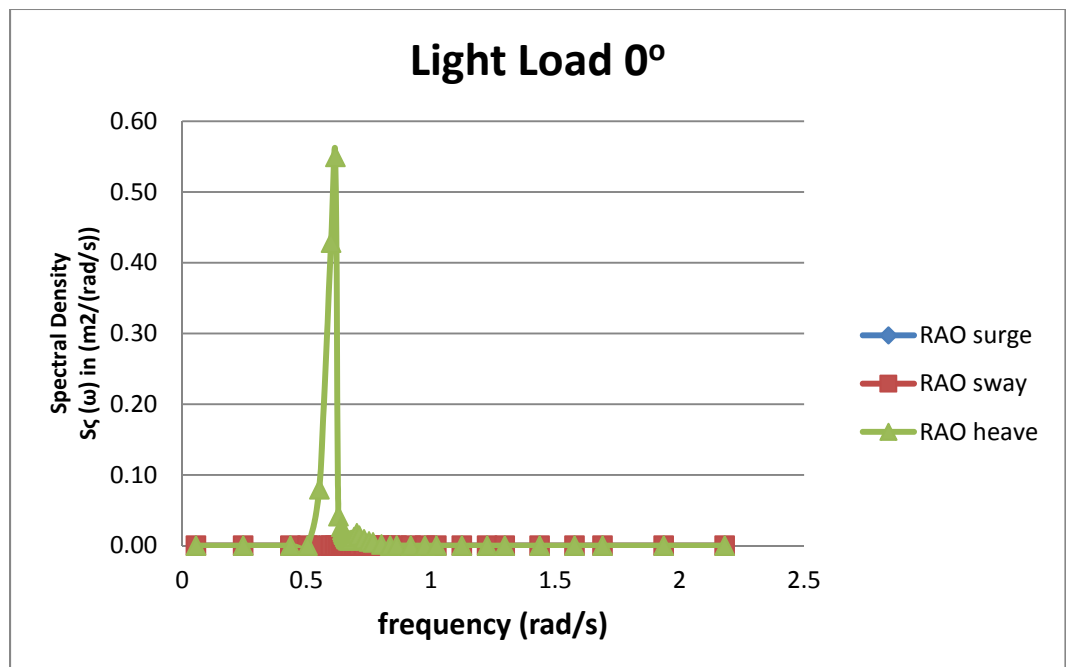


**Gambar 4.65** Grafik respon spektra gerakan translasi pada FSO Ladinda saat kondisi *full load* tertambat dengan *heading* pembebanan 0 derajat

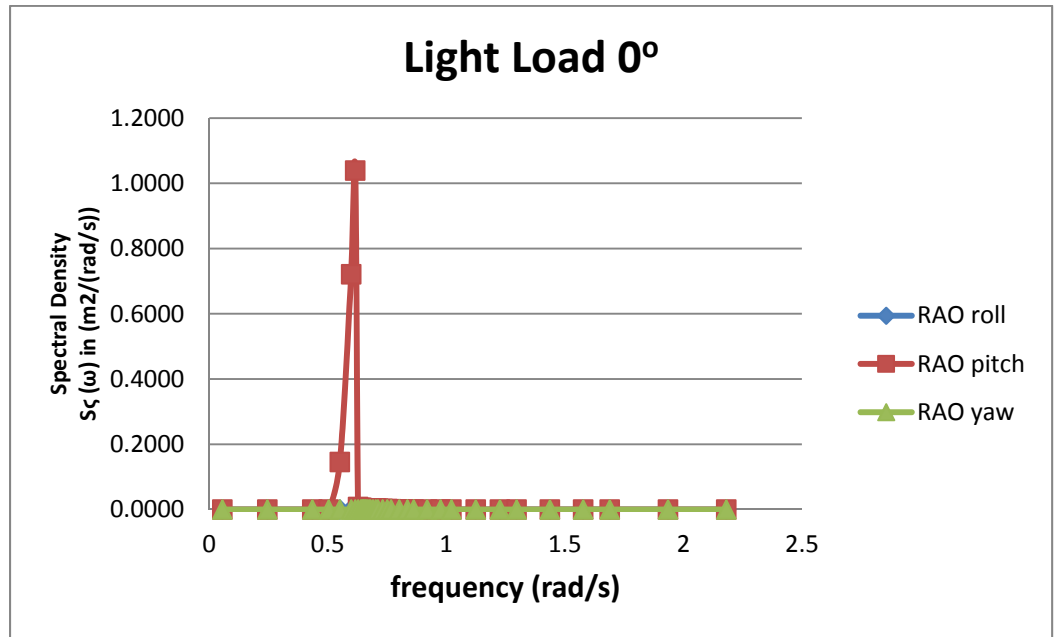


**Gambar 4.66** Grafik respon spektra gerakan translasi pada FSO Ladinda saat kondisi *full load* tertambat dengan *heading* pembebanan 0 derajat

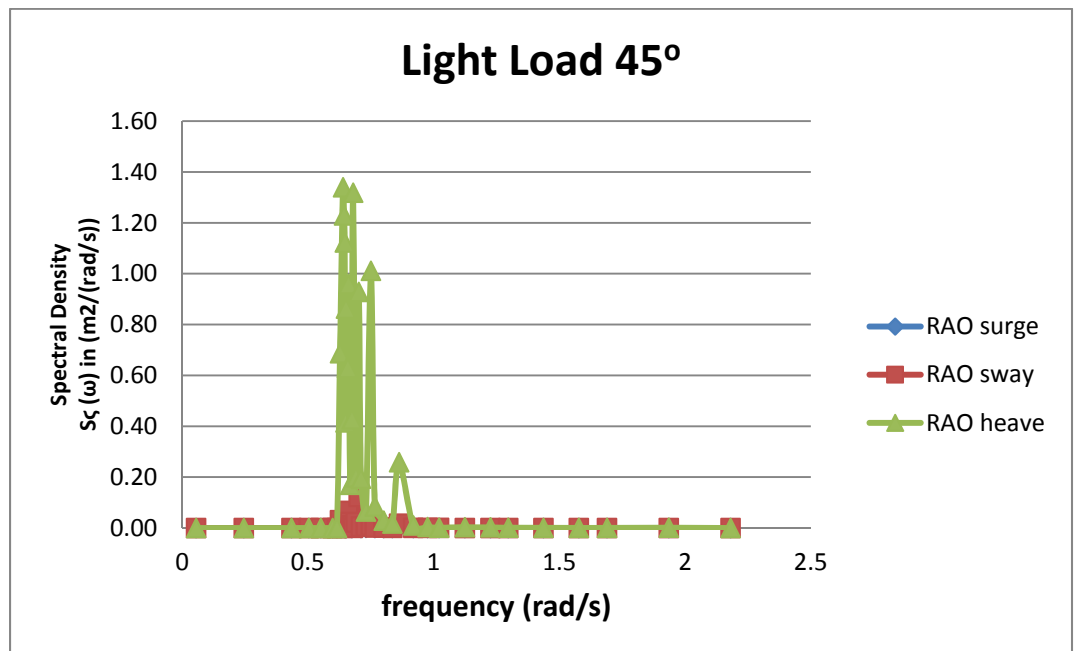
- Analisa Perilaku FSO dengan muatan kosong (*Light Load Condition*)



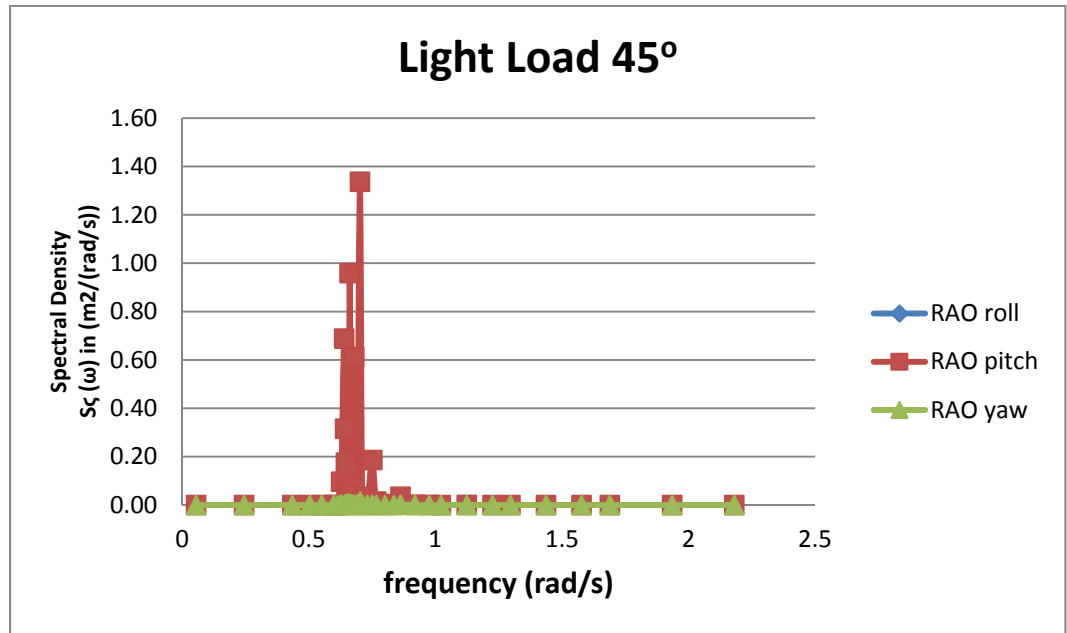
**Gambar 4.67** Grafik respon spektra gerakan translasi pada FSO Ladinda saat kondisi *full load* tertambat dengan *heading* pembebanan 0 derajat



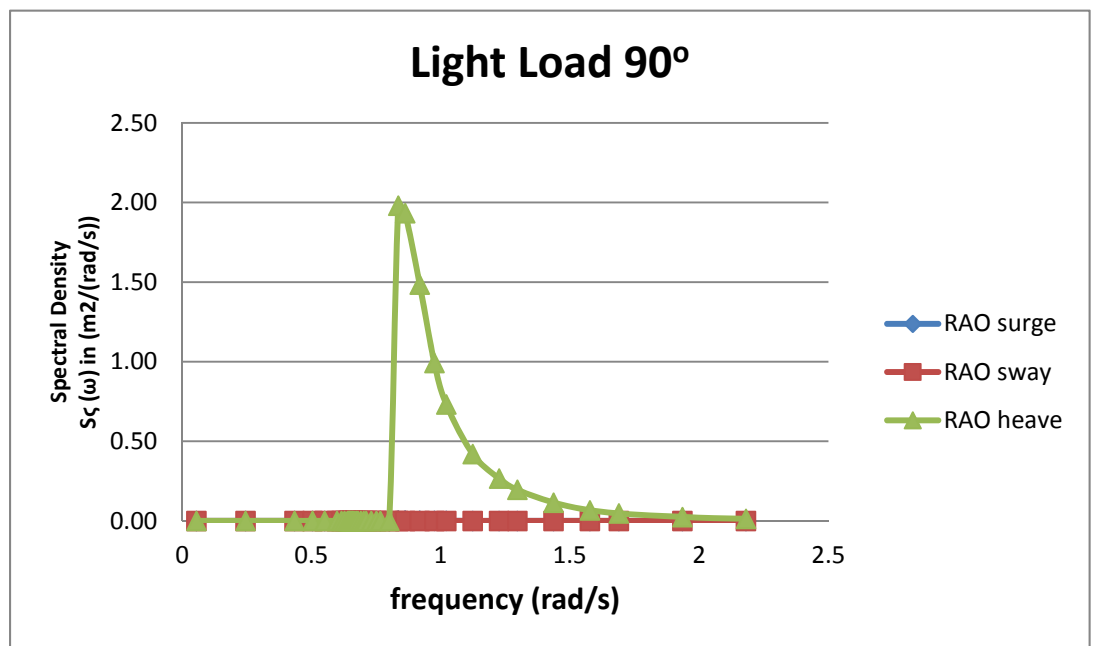
**Gambar 4.68** Grafik respon spektra gerakan translasi pada FSO Ladinda saat kondisi *full load* tertambat dengan *heading* pembebanan 0 derajat



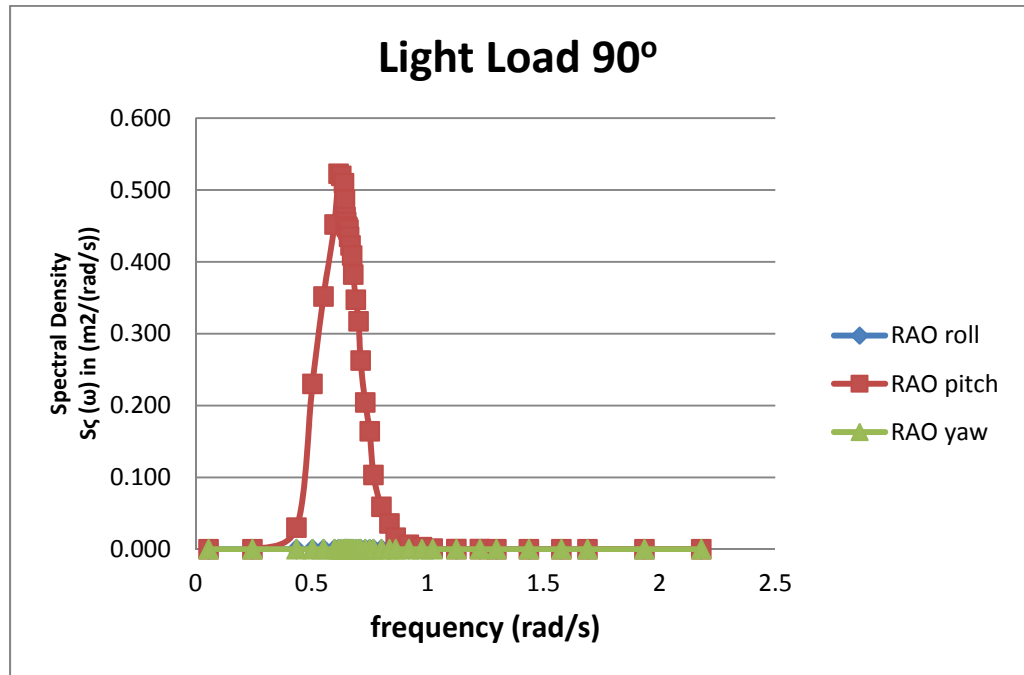
**Gambar 4.69** Grafik respon spektra gerakan translasi pada FSO Ladinda saat kondisi *full load* tertambat dengan *heading* pembebanan 0 derajat



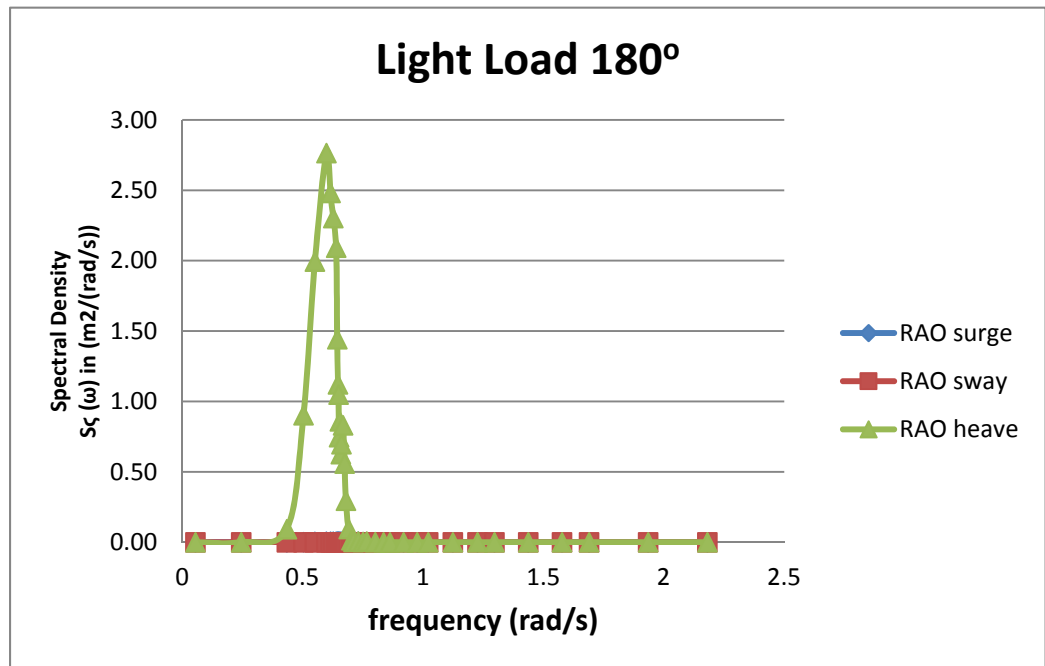
**Gambar 4.70** Grafik respon spektra gerakan translasi pada FSO Ladinda saat kondisi *full load* tertambat dengan *heading* pembebanan 0 derajat



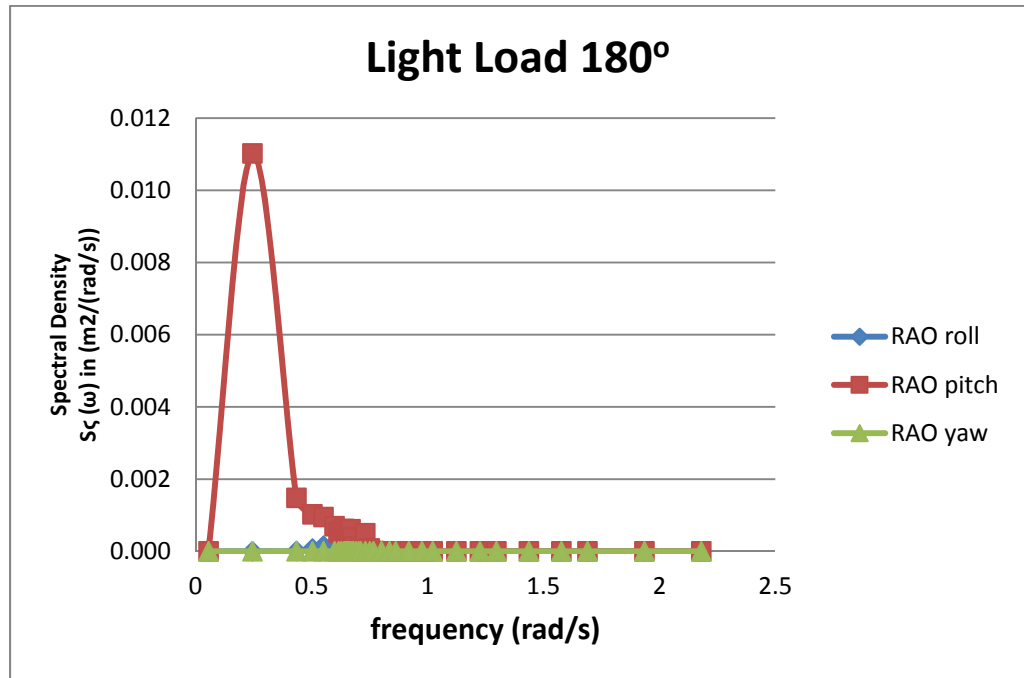
**Gambar 4.71** Grafik respon spektra gerakan translasi pada FSO Ladinda saat kondisi *full load* tertambat dengan *heading* pembebanan 0 derajat



**Gambar 4.72** Grafik respon spektra gerakan translasi pada FSO Ladinda saat kondisi *full load* tertambat dengan *heading* pembebanan 0 derajat



**Gambar 4.73** Grafik respon spektra gerakan translasi pada FSO Ladinda saat kondisi *full load* tertambat dengan *heading* pembebanan 0 derajat



**Gambar 4.74** Grafik respon spektra gerakan translasi pada FSO Ladinda saat kondisi *full load* tertambat dengan *heading* pembebanan 0 derajat



(Halaman ini sengaja dikosongkan)

**LAMPIRAN C**

**HASIL ANALISA TEGANGAN**

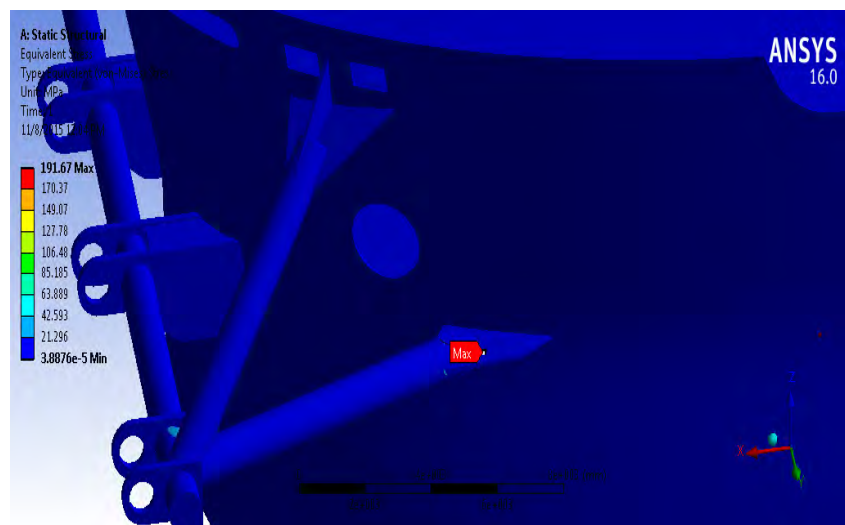
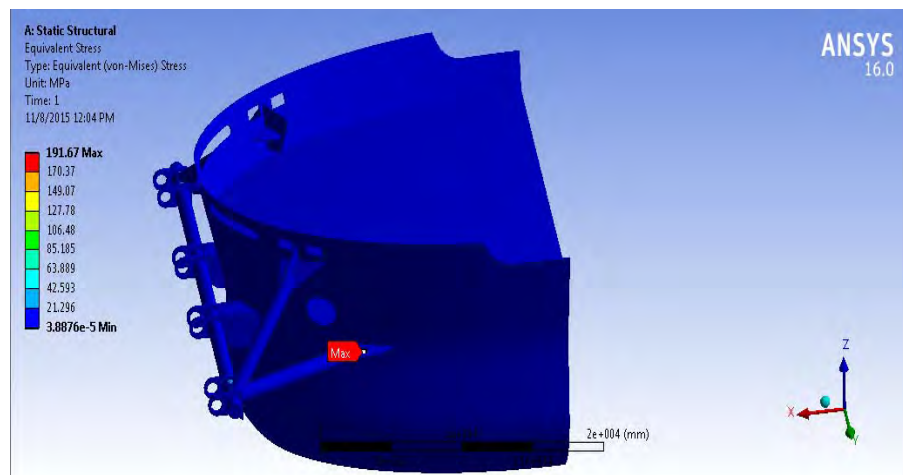
**LOKAL MAKSIMUM YOKE**

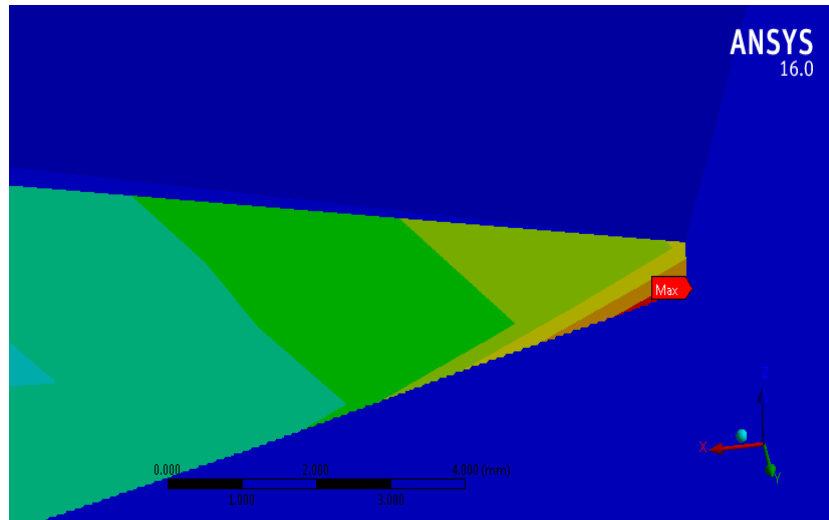
**ARM FSO Ladinda**

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

## HASIL ANALISIS TEGANGAN LOKAL SAMBUNGAN YOKE ARM pada FSO Ladinda

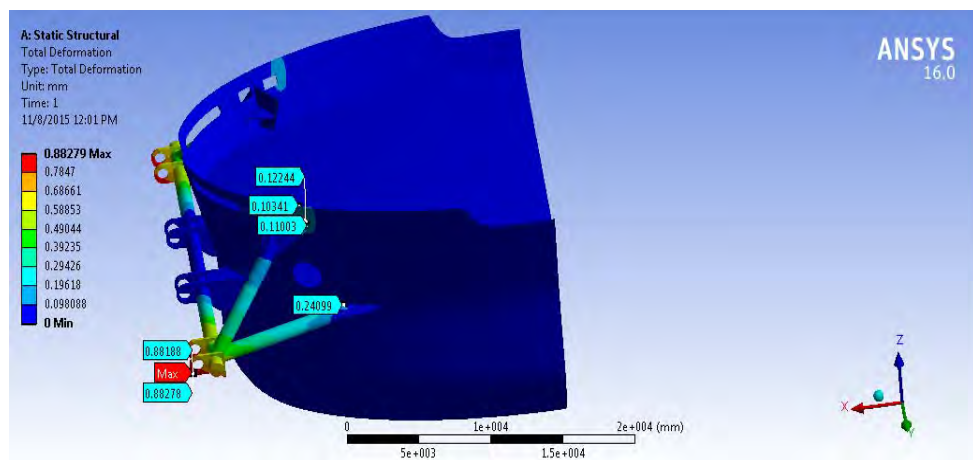
Tegangan maksimum pada konstruksi sambungan Yoke Arm dengan FSO  
Ladinda *heading* 180° pada kondisi FSO muatan kosong (Light Load)



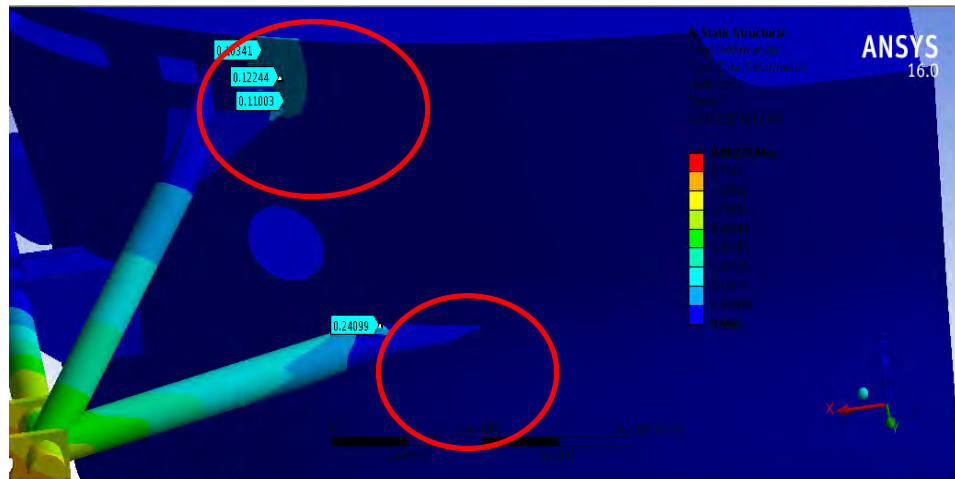


**Gambar** Tegangan maksimum pada konstruksi sambungan *yoke arm* dengan FSO Ladinda

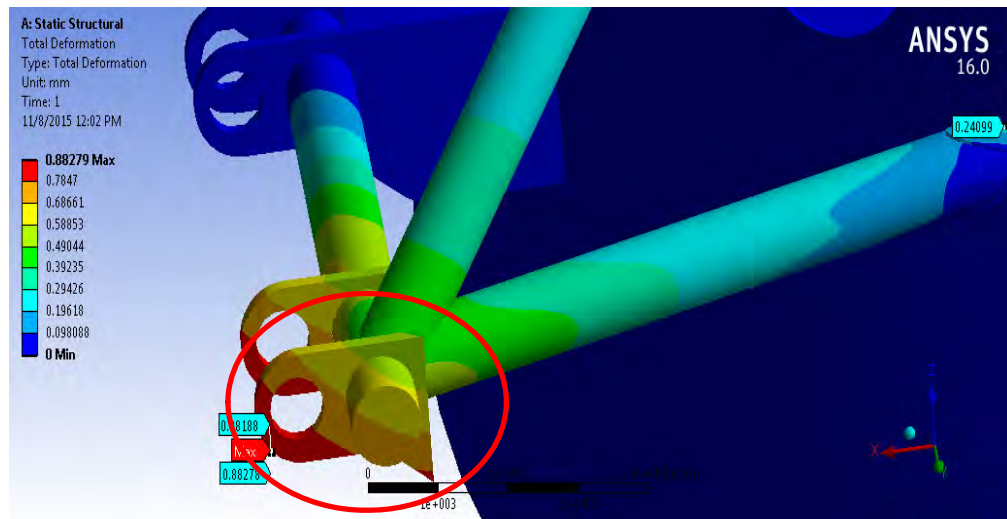
### Deformasi maksimum pada konstruksi sambungan Yoke Arm dengan FSO Ladinda *heading* 180° pada kondisi FSO muatan kosong (Light Load)



**Gambar** Deformasi maksimum pada konstruksi sambungan *yoke arm* dengna FSO Ladinda



**Gambar** Deformasi pada konstruksi sambungan *yoke arm* dengan *hull* FSO Ladinda



**Gambar** Deformasi pada konstruksi sambungan *yoke arm* dengan pengait *yoke arm*

## **BIODATA PENULIS**



Ariesta Ayu Dian Anggareni dilahirkan di Tuban pada tanggal 30 April 1993. Pendidikan di SDN Sawunggaling VII Surabaya, SMP Negeri 4 Surabaya dan SMA Negeri 1 Surabaya. Setelah itu penulis melanjutkan studi sarjana di Jurusan Teknik Kelautan, Fakultas Teknologi Kelautan, Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya. Selama kuliah, penulis sempat aktif menjadi staff Kewirausahaan HIMATEKLA 12/13 dan menjadi kepala divisi finance kewirausahaan pada periode HIMATEKLA 13/14. Penulis juga aktif dalam panitia kegiatan kampus. Penulis juga pernah melaksanakan kerja praktek di PT Depriwangga Engineering pada tahun 2014 dan pernah mengerjakan Magang di PT Energi Mega Persada. Bidang yang dipilih oleh penulis adalah hidrodinamika lepas pantai sehingga Tugas Akhir yang diambil berhubungan dengan kriteria Olah Gerak Bangunan Apung.